

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Hornicko – geologická fakulta

Institut environmentálního inženýrství

**Magnetická separace směsí mikročástic pocházejících
z hutnického odpadu**

**Magnetic separation of microparticles mix coming from
metallurgical waste**

Diplomová práce

Autor:

Bc. Jan Skřivánek

Vedoucí diplomové práce:

Mgr. Petr Jandačka, Ph.D.

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Hornicko-geologická fakulta
Institut environmentálního inženýrství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Skřivánek**
Studijní program: N2102 Nerostné suroviny
Studijní obor: 3904T022 Zpracování a zneškodňování odpadů
Téma: **Magnetická separace směsí mikročástic pocházejících z hutnického odpadu**
Magnetic separation of microparticles mix coming from metallurgical waste

Zásady pro vypracování:

- 1) Magnetické vlastnosti materiálů
- 2) Způsoby mokré magnetické separace
- 3) Charakterizace zkoumaných látek
- 4) Návrh a realizace laboratorního mag. separátoru mikročástic a testování jeho funkce
- 5) Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- 1) Hatch, P.G., Stelter, R.E. Magnetic design considerations for devices and particles used for biological high-gradient magnetic separation (HGMS) systems. Journal of magnetism and magnetic materials 225, (2001), pages 262-276
- 2) Mechlová, E., Košťál, K. Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz. Prometheus, Nový Bor 1999.

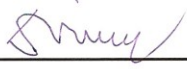
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Mgr. Petr Jandačka, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2012

Datum odevzdání: 30.04.2013



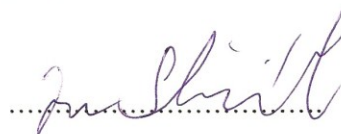

prof. Ing. Vojtech Dirner, CSc.
vedoucí institutu


prof. Ing. Vladimír Slivka, CSc., dr.h.c.
děkan fakulty

Autorské prohlášení

- Celou diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracovala samostatně a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.
- Byla jsem seznámena s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Souhlasím s tím, že diplomová práce je licencována pod Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported licencí. Pro zobrazení kopie této licence, je možno navštívit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu o komerční využití z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu komerčnímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě dne 26. dubna 2013



Jan Skřivánek

Anotace

Diplomová práce se zabývá možností recyklace hutnického odpadu na základě odlišných magnetických vlastností látek za pomoci magnetických separátorů. Tato práce charakterizuje problematiku hutnického odpadu a popisuje jednotlivé hutnické odpady. Dále se zaměřuje na zákonitosti týkající se magnetismu, způsoby magnetické separace a rozdělení základních magnetických separátorů. V experimentální části je věnováno popisu laboratorního separátoru, testování jeho rozdružovací funkce a magnetické separace hutnického odpadu.

Klíčová slova: magnetismus, magnetická separace, magnetický separátor, hutnický odpad, kaly

Summary

This diploma thesis deals with the possibility of recycling of metallurgical waste under different magnetic properties of substances by means of magnetic separators. This thesis describes the issue of metallurgical waste and describes the metallurgical wastes. It also focuses on regularities concerning magnetism, methods of magnetic separation and classification of the magnetic separators. The experimental section is devoted to the description of laboratory separator, testing its separating function and magnetic separation metallurgical waste.

Keywords: magnetism, magnetic separation, magnetic separator, metallurgical waste, sludge

Poděkování

Chtěl bych tímto rád poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Mgr. Petru Jandačkovi, Ph.D. za odborné vedení a pomoc při řešení problémů týkající se zpracování diplomové práce. Dále bych poděkoval Ing. Martině Mahuliakové a Ing. Janě Repkové při asistenci laboratorního výzkumu, za poskytnutí vzorků kalů z Třineckých železáren panu doc. Ing. Jiřímu Botulovi, Ph.D. a za zpracování RTG difrakce a vytvoření fotografických snímků zkoumaného vzorku panu Dr. Ing. Daliborovi Matýskovi.

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Teoretická část práce	2
2.1. Magnetické vlastnosti materiálů	2
2.1.1. Magnetické veličiny.....	2
2.1.2. Magnetismus.....	4
2.1.3. Magnetická hysterezní křivka	7
2.2. Způsoby magnetické separace.....	9
2.2.1. Magnetická separace	9
2.2.2. Využití magnetické separace	10
2.2.3. Magnetické separátory	11
2.2.4. Rozdělení mag. separátorů.....	13
2.2.5. Firmy zabývající se výrobou magnetických separátorů	17
2.3. Hutnický odpad	19
2.3.1. Recyklace odpadů v hutním závodě	20
2.3.2. Popis jednotlivých hutních odpadů	23
3. Praktická část	28
3.1. Popis použitých přístrojů.....	28
3.1.1. Teslametr s Halloovou sondou Elimag MP-1	28
3.1.2. Microsense Magnetometer EV9 Vibrating Sample	29
3.1.3. Elektronový mikroskop Quanta 650 FEG	30
3.1.4. Laboratorní zdroj HY1803D.....	30
3.1.5. Spektrální fotometr Spekol 1	31
3.2. Charakteristika zkoumaných látek	32
3.2.1. Bentonit.....	32
3.2.2. Magnetit Fe_3O_4	33
3.2.3. Směs mikročástic α - Fe_2O_3 (hematit), β - Fe_2O_3 , γ - Fe_2O_3 (maghemit).....	35
3.2.4. Kal určený pro výzkum.....	36
3.3. Testování mag. separátoru a separace nanočástic hutnického odpadu	40
3.3.1. Popis používaného magnetického separátoru	40
3.3.2. Obecný postup magnetické separace u laboratorního separátoru:	42
3.3.3. Fáze 1 - Testovací magnetická separace dvousložkové směsi	43

3.3.4.	Fáze 2 – Testovací separace magnetitu a směsi nanočástic Fe_2O_3	44
3.3.5.	Fáze 3 - Výsledná magnetická separace kalu z Třineckých železáren	45
4.	Závěr	48
	Seznam použité literatury	50
	Seznam obrázků	54
	Seznam tabulek	55

Seznam použitých zkratek

mag. – magnetické/m

VPP – vysokopecní prach

VPK – vysokopecní kal

hmot. – hmotnostních

OO – ocelářenský odprašek

OKJ – ocelářenské kaly jemné

OKH – ocelářenské kaly hrubé

tab. – tabulka

obr. – obrázek

RTG – rentgenová

TŽ – Třinecké železářny

1. Úvod

Moravskoslezský kraj v České republice byl v minulosti a je i v současnosti charakterizován velmi vysokým rozsahem hutnické výroby. Úroveň hutnictví je mírou ekonomické vyspělé společnosti, ale toto průmyslové odvětví také patří mezi největší znečišťovatele životního prostředí. Je proto dlouhodobá snaha o maximálně možnou recyklaci železonosných odpadů.

Jedna z možností recyklace hutnického odpadu je i na základě rozdělování materiálů podle magnetických vlastností látek s využitím magnetických separátorů. Touto možností se zabývala diplomová práce, ve které byl použit jako hutnický odpad jemnozrnný kal z Třineckých železáren.

Pro magnetickou separaci kalu byl použit laboratorní separátor, u kterého se v praktické části otestovaly jeho funkce. Ještě před testováním rozdělovače byla na magnetometru u zkoumaných látek změřena závislost intenzity magnetického pole na magnetizaci, která byla vyjádřena magnetickou hysterezní smyčkou a jejich susceptibilitou.

Dále jsou v kapitolách této práce charakterizovány důležité magnetické veličiny a magnetismus. Následuje vysvětlení magnetické separace, jejich využití a popis magnetických separátorů. Jako poslední v teoretické části se práce zabývá problematikou hutnického odpadu.

Celkovým cílem práce je pomocí mokré magnetické separace oddělit magnetické částice od nemagnetické složky kalu, vyhodnotit výsledky a prodiskutovat přínos pro recyklaci v hutnictví.

2. Teoretická část práce

2.1. Magnetické vlastnosti materiálů

2.1.1. Magnetické veličiny

V této kapitole jsou popsány důležité magnetické veličiny, které jsou použity v této práci.

Magnetická indukce

Magnetická indukce \mathbf{B} je definována jako pomocí síly \mathbf{F}_B působící na částici s nábojem Q , která se pohybuje rychlostí \mathbf{v} v magnetickém poli: ^[1]

$$\mathbf{F}_B = Q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Jednotkou B v soustavě SI je tesla (T): $1\text{ T} = 1\text{ N}\cdot\text{A}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$

Každá látka je schopna se ve vnějším magnetickém poli magnetizovat, tj. získat nenulový makroskopický magnetický moment, čímž se stává zdrojem magnetického pole o magnetické indukci \vec{B}_i . ^[2]

Indukovaná magnetická indukce \vec{B}_i se skládá s vnějším magnetickým polem \vec{B}_o :

$$\vec{B} = \vec{B}_o + \vec{B}_i$$

Intenzita magnetického pole^[3]

Vztah mezi elektrickým proudem a **intenzitou magnetického pole**:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I$$

Ve vakuu je intenzita magnetického pole definována:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}$$

Permeabilita prostředí^[4]

Je vyjádřena jako součin relativní permeability μ_r a permeability vakua μ_0 .

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

Permeabilita vakua (*magnetická konstanta*)

Univerzální konstanta, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1} = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$

Relativní permeabilita

Pro izotermické prostředí skalární veličiny vyjadřující zesílení nebo zeslabení silových účinků, platí vztah:

$$\mu_r = \frac{B}{B_0}$$

Magnetizace^[1]

Vektor, který vyjadřuje míru zmagnetizování látky. Ten udává magnetický dipólový moment jednotkového objemu látky:

$$M = \frac{m}{V}$$

Jednotkou je $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$.

Magnetická susceptibilita^[5]

Je to schopnost látky se magnetovat ve vnějším magnetickém poli, platí:

$$\chi = \frac{M}{H} \quad ; \quad \chi = \mu_r - 1$$

2.1.2. Magnetismus

Každý elektron v atomu má orbitální a spinový dipólový magnetický moment, které se vertikálně skládají. Výslednice těchto dvou vektorů se vektorově skládá s výslednicemi ostatních elektronů v atomu. Pokud součet všech těchto magnetických dipólových momentů vytváří makroskopické magnetické pole, je látka magnetická.

Magnetické materiály se dělí podle různé magnetizace:

Diamagnetismus - vykazují všechny látky. Je ale tak slabý, že je překryt, když látka vykazuje také paramagnetismus nebo feromagnetismus. Umístíme-li jakoukoliv látku do vnějšího magnetického pole, indukují se v jejích atomech slabé magnetické dipólové momenty orientované proti vnějšímu poli. Výsledné působení všech indukovaných dipólů je však zdrojem pouze slabého magnetického pole. Dipólové momenty, a tedy i jejich slabé pole zmizí, jestliže vnější pole odstraníme. ^[1]

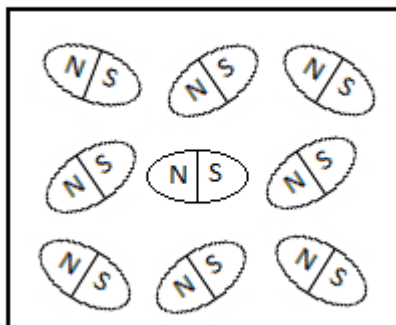
Diamagnetické látky se skládají z diamagnetických atomů a mají relativní permeabilitu menší než 1 ($\mu_r < 1$) a magnetickou susceptibilitu χ_m menší než 0 ($\chi_m < 0$). To znamená, že tyto látky mírně zeslabují magnetické pole (patří sem např. inertní plyny, voda, zlato, měď, rtuť). Diamagnetická látka se od magnetu odpuzuje. ^[6]

Paramagnetismus - vykazují všechny látky, jejichž atomy mají nenulový moment hybnosti (např. všechny atomy s lichým počtem elektronů), a zejména látky obsahující přechodové prvky, prvky vzácných zemin. Každý atom takovéto látky má tedy i bez vnějšího působení svůj magnetický dipólový moment. Tyto momenty jsou však v látce náhodně orientovány, takže látka jako celek nemá výsledné magnetické pole. Vnější magnetické pole může částečně uspořádat atomové magnetické momenty souhlasně s vnějším polem a tím se v látce vytvoří magnetické pole. ^[1]

Paramagnetické látky mají relativní permeabilitu větší než 1 ($\mu_r > 1$) a magnetickou susceptibilitu χ_m větší než 0 (řádově od 10^{-6} do 10^{-1}). Tyto látky mírně zesilují magnetické pole. Patří sem např. draslík, sodík, hliník, modrá skalice aj.

Paramagnetická látka se k magnetu přitahuje, a bude sama přitahovat drobné kovové předměty pouze v případě, že bude v blízkosti magnetu. Paramagnetickou látku není možné zmagnetovat trvale. ^[6]

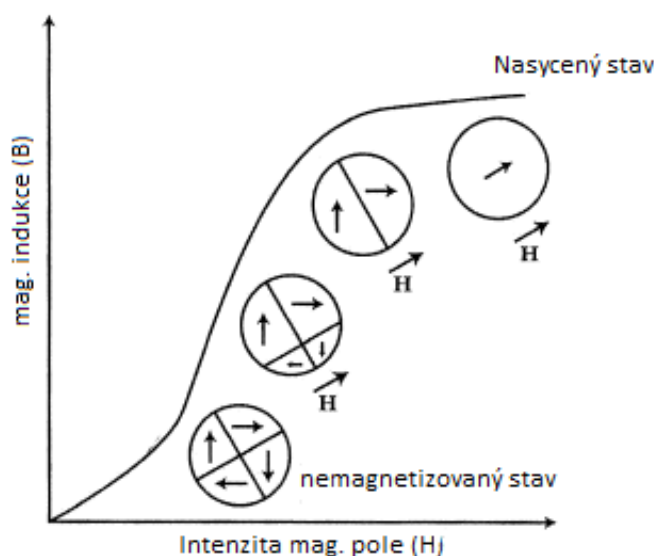
Strukturu paramagnetické látky lze přiblížit na obr. 1. Zmagnetované oblasti jsou v paramagnetické látce výrazně menší než v látce feromagnetické - v látce paramagnetické se jedná pouze o jednotlivé atomy, zatímco v látce feromagnetické jde o shluky atomů. Tyto oblasti není možné v paramagnetické látce uspořádat ve směru vnějšího magnetického pole (jako u látky feromagnetické).^[7]



Obrázek 1 Struktura paramagnetické látky - překresleno podle^[7]

Feromagnetismus - příčinou magnetizace látky je působení výměnných sil mezi sousedními atomy. Působením těchto sil vzniká souměrné uspořádání magnetických polí v malé oblasti látky a to i bez vnějšího magnetického pole. Při této samovolné magnetizaci vznikají v látce zmagnetizované mikroskopické oblasti zvané magnetické domény, které jsou nahodile orientovány.^[4]

Jakmile pohyb domén bude orientován v jednom směru, odstraní se všechny nepříznivě orientované domény. Magnetizace bude ve směru jedné domény, která zůstává paralelně otočená k danému mag. poli (viz obr. 2).^[6]



Obrázek 2 Účinek mag. pole v doméně feromagnetického materiálu - překresleno podle^[6]

Pro každou feromagnetickou látku existuje určitá teplota (tzv. Curieova teplota), při jejímž překročení látka ztrácí feromagnetické vlastnosti a stává se látkou paramagnetickou. Po překročení Curieovy teploty (řádově stovky stupňů Celsia) je tepelný pohyb tak intenzivní, že se vzniklé magnetické domény rozpadají zpět na jednotlivé atomy.

Vzniku domén totiž brání vnitřní tepelný pohyb částic. Proto se tyto domény snáze vytvoří v přítomnosti vnějšího magnetického pole. Před opětovným vytvořením magnetických domén je nutný ohřev na Curieovu teplotu proto, aby se intenzivním tepelným pohybem rozpadly zbytky magnetických domén, které mohly ve struktuře látky zůstat z předchozího magnetování. Bez ohřevu na Curieovu teplotu by bylo nutné použít velmi silné vnější magnetické pole.^[7]

Feromagnetické materiály mají relativní permeabilitu μ_r mnohem větší než 1 ($\mu_r \gg 1$) a i magnetickou susceptibilitu χ_m mají mnohem větší než 0 ($\chi_m \gg 0$). Slabým magnetickým polem lze u nich vyvolat takové uspořádání atomů, že se magnetické pole zesílí a dojde k magnetizaci látky. Magnetické pole ve feromagnetické látce zůstává, i když vnější pole zanikne.^[1]

Feromagnetismus se projevuje jen tehdy, je-li látka v krystalickém stavu - v kapalném nebo plynném stavu se chovají jako látky paramagnetické. Feromagnetismus je tedy vlastností struktury, ne jednotlivých atomů.

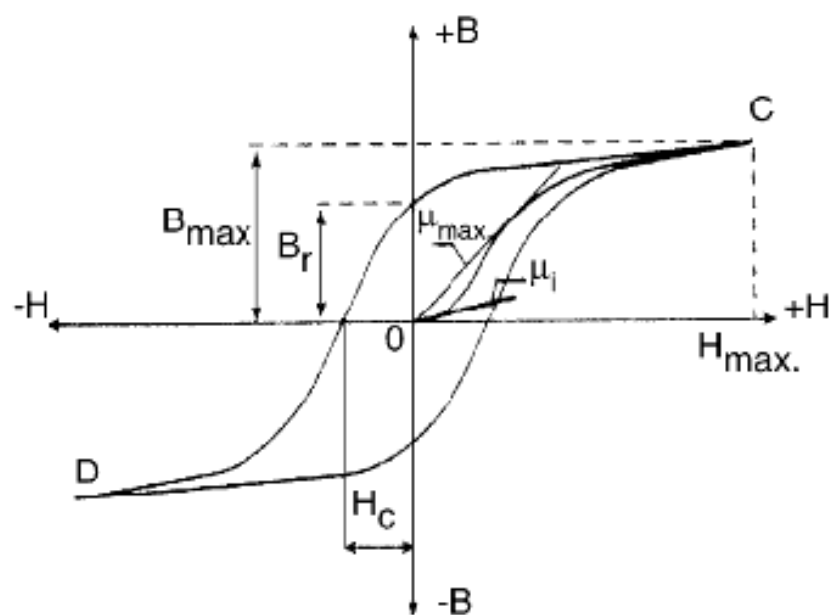
Počet feromagnetických látek není velký, mají ale značný praktický význam: vyrábějí se z nich jádra cívek v elektromagnetech, transformátorech, elektrických strojích, aj.^[7]

Ferimagnetismus – tato schopnost látek patří mezi feromagnetismus. Látky se samovolnou vnitřní mag. polarizací, která je tvořená soustavami atomů se shodně orientovanými magnetické momenty. Ferity jsou silně mg. látky s relativní permeabilitou μ_r dosahující vysokých hodnot. Při zvýšení teploty na hodnotu označovanou jako Néelova teplota přejde tato látka z ferimagnetické do paramagnetické fáze. Ferity mají mnohem větší elektrický odpor než kovové feromagnetické látky, a proto našly široké uplatnění v praxi (slaboproudá elektrotechnika, permanentní magnety, ...). Mezi tyto látky patří sloučeniny železa s oxidy jiných kovů (Mn, Ba, ...).^[4]

2.1.3. Magnetická hysterezní křivka

Magnetické vlastnosti materiálu můžeme charakterizovat magnetickou hysterezní smyčkou, která vyjadřuje závislost materiálu na magnetizaci vnějšího magnetického pole.

Ze začátku zmagnetizovaný vzorek materiálu (bod 0 na obr. 3) podléhá kladnému magnetickému poli o magnetické intenzitě H , vyvolávající vnitřní magnetické pole o magnetické indukci B . Toto pole se postupně zvětšuje, přičemž vyvolá prvotní magnetizační křivku (body 0C na obr. 3), s počáteční permeabilitou (μ_i). Sklon této křivky udává maximální permeabilitu (μ_{\max}). Není-li žádné další zvětšení magnetické indukce nebo zvětšení magnetizace u magnetického pole (bod C), pak je zmíněný materiál magneticky nasycen. Bod B_{\max} je charakterizován jako maximální nasycení indukce. Poté následuje postupné snižování na nulu, jsou pozorovány dva jevy. První z nich je, že pokles na vnitřním poli probíhá podél jiné křivky. Druhá je, že pole zůstává na velikosti B_r . Týká se to také magnetické remanence. Tato zbývající indukce může zrušit negativní magnetické pole, tento bod mg. pole se nazývá koercivita. Podle postupného růstu pole v záporném rozsahu, materiál opět dosáhne úrovně nasycení (bod D). Pokud je tento cyklus převrácen, pak je hysterezní smyčka uzavřena (linie DC).^[8,3]



Obrázek 3 Hystereze feromagnetického materiálu - překresleno podle článku^[8]

2.2. Způsoby magnetické separace

2.2.1. Magnetická separace

Dělení v magnetickém poli je uskutečnitelné, jestliže se dělené minerály dostatečně liší v magnetických vlastnostech. Na zrno v magnetickém poli působí dva druhy sil, magnetická F_{mag} a mechanická síla F_{mech} (gravitace, setrvačnost, tření a odpor prostředí). Aby zrno mohlo být z daného prostředí magneticky odděleno, pak platí $F_{\text{mag}} > F_{\text{mech}}$.

Pro dělení dvou zrn, silněji magnetických (index 1) od slaběji magnetických (index 2) musí platit: $F_{\text{mag1}} > F_{\text{mech1}}$ a $F_{\text{mag2}} < F_{\text{mech2}}$ čili $\frac{F_{\text{mag1}}}{F_{\text{mech1}}} > 1; \frac{F_{\text{mag2}}}{F_{\text{mech2}}} < 1$

Magnetické dělení je proveditelné jen v nehomogenním magnetickém poli, které má grád H nenulový. V heterogenním poli, které vzniká mezi dvěma různými pólovými konci, působí na magnetickou látku translatorické síly, které jí vnucují pohyb. Bude-li permeabilita látky vyšší než v prostředí, pak bude síla působit směrem do koncentrovanější části magnetického pole. Naopak při opačné permeabilitě, bude síla působit ve směru ven z magnetického pole.^[9]

Magnetickou separaci můžeme rozdělit na dva typy podle separačního prostředí. Na separaci využívající kapaliny, kdy materiál určený k separování tvoří tekutou suspenzi a na separátory ve kterých separace probíhá v suchém prostředí. Využití jedné či druhé metody se dá odvodit podle rozměrů částic v separovaných materiálech.

Separace v tekutém prostředí

Pro malé částice se jako separační prostředí využívá tekutá suspenze, kdy je materiál pomocí tekutiny rozmíchán do homogenní směsi. Ta se poté čerpadlem či systémem čerpadel přečerpává přes určitý magnetický prvek, pomocí něhož dochází k zachytu magnetických částic z protékající suspenze. Pokud se magnetická složka uvažuje jako parazitní (například v čistících procesech apod.), je výsledná suspenze zbavená magnetických částic, odvedena k dalšímu zpracování. Naopak pokud se snažíme získat magnetickou složku, stává se z výsledné suspenze odpad. Často jsou také tyto suspenze vedeny zpět do magnetického separátoru, kde dochází k opakování separačních procesů z důvodu zvýšení účinnosti samotné separace. Oproti separačnímu prostředí probíhající

ve vzdušném prostředí je zde nevýhoda, že může docházet k zacpávání magnetického separátoru z důvodu shlukování částic v suspenzi. Proto se často používají různá doplňková zařízení s cílem zabránit tomuto jevu.

Separace v suchém prostředí

Pro separování větších magnetických částic se zpravidla používá jako separační prostředí vzduch. Jak už bylo řečeno, při použití separace v tekutém prostředí, by mohlo docházet k častému zanášení soustavy a průchodnost takovéto suspenze by mohla být velice problematická. Z těchto a dalších důvodů se používá separace na vzduchu. Na rozdíl od tekuté suspenze se zde nepoužívá čerpadel, ale speciálních pásových dopravníků, které jsou popsány v samostatné kapitole. Mimo těchto dopravníků může být použita i spousta jiných alternativních způsobů lišících se svou konstrukcí.^[10]

2.2.2. Využití magnetické separace

Odstranění částic z roztoku s použitím magnetické separace je mnohem efektivnější a často mnohem rychlejší než odstřeďování nebo filtrace.^[11]

Použití separace na oddělení malých magnetických částic je technika, která byla původně navržena při vyhledávání magnetických látek v sedimentech na oceánském dně. V počátcích této technologie se vytvářely pokroky u materiálů a zařízení pro separaci slabě magnetických a velmi jemných magnetických částic z tekutinové suspenze. V sedmdesátých a osmdesátých letech minulého století byly magnetické separace zaměřeny na odstraňování znečišťujících látek z odpadních vod, odsíření uhlí, minerální čištění a zpracování ropy. Byly také prováděny aplikace v biologickém průmyslu při oddělení červených krvinek z krve pomocí magnetického momentu hemoglobinu. V dalším desetiletí minulého století a začátkem tohoto století byly magnetické rozdužovací techniky přijaty v několika biotechnologických odvětvích a v aplikacích dodávání léčiv. V současnosti je velký zájem o navrhování a výrobu vysoce účinných magnetických separačních systémů pro stávající i nově vznikající průmyslová odvětví.^[12, 13]

Magnetická separace se také používá u odstraňování železitých nečistot (jako jsou slídy, turmalín nebo pyrit) při zpracování přírodního kaolinu. Po nepřetržitém čištění magnetickým separátorem vzniká čistý bílý kaolin pro výrobu papíru a porcelánu.

Při výrobě 1 t oceli se pro čištění a chlazení vyžaduje 150 t vody, tyto odpadní vody musejí být čištěny a jako ideální řešení se opět ukazuje mag. separace. Podobné použití při čištění odpadních vod z oceláren lze najít v elektrárnách, kde odstraňování feromagnetických nebo paramagnetických částic z chladicí soustavy prodlužuje jejich životnost. Separace na bázi rozdílných magnetických vlastností může být také použita při čištění ovzduší, protože popílek z uhelných elektráren obsahuje z 18% oxid železitý, který v některém průmyslu může nahradit magnetit.

Úprava železitých rud se provádí magnetickou separací lépe než u chemických zpracovatelských metod, protože hustota železitých látek a průvodních hornin jsou podobná, ale magnetické vlastnosti jsou u každé látky odlišné. V současnosti existují separátory, které oddělují železo z rud s téměř 100% účinností.

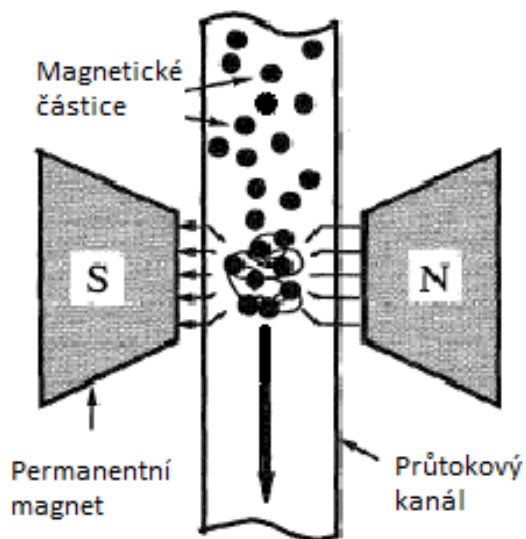
Vzhledem k přísným normám u jakosti potravin se magnetická separace používá pro oddělení prvků vzácných zemin. Výhodná je i magnetická separace živočišných buněk především proto, že umožňuje izolovat cílové buňky přímo z média, tj. krve, kostní dřeně, tkání, stolice atd.^[14]

2.2.3. Magnetické separátory

Zařízení pro separaci magnetických materiálů využívá různé mechanické provedení. Princip fungování magnetických separačních zařízení je interakce mezi magnetickými a gravitačními silami uvnitř magnetického separátoru.

Vstupní materiál je rozdělen v magnetickém separátoru do dvou nebo více částí. Pokud u separátoru je vstupní materiál magnetický koncentrát, pak výstupní materiál je nemagnetická složka. Magnetický koncentrát a méně magnetické složky (meziprodukt) musí být přepravovány přes separátor. Magnetické, gravitační, třecí, hydrodynamické, nebo setrvačné síly mají tendenci oddělit částice, mezi-částicové síly mají zase tendenci snižovat stupeň oddělení. V každé separaci mohou být magnetické a nemagnetické částice přítomny ve výstupním produktu nebo v meziproduktu, ale pouze v limitním případě, v opačném případě by magnetická separace nebyla považována za úplnou.^[15]

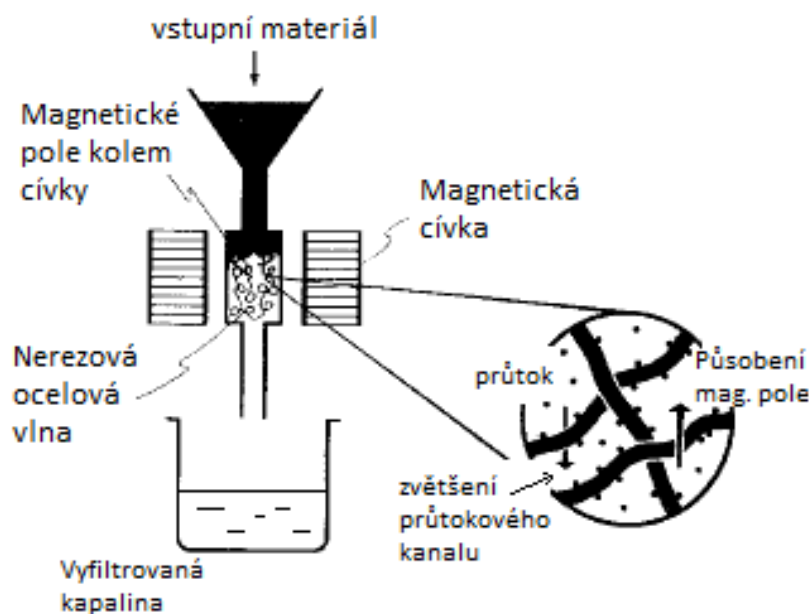
V běžných magnetických separátorech, jak je znázorněno na obr. 4, magnetické částice, které jsou přítomné v tekutině, jsou vystaveny magnetickému poli, které je produkováno řadou permanentních magnetů.^[12]



Obrázek 4 Schéma konvenční magnetického separátoru s permanentními magnety - překresleno podle ^[12]

Aby v praxi bylo u separátorů dosaženo magnetického gradientu pole, které je dostatečné k oddělení částic, jsou využity kvadrupólové nebo vícepólové permanentní magnety a ferromagnetické dráty nebo vlna jako tomu je u mag. separátoru typu Kolm (viz obr. 5). Pokud jsou magnetické částice vystaveny mag. poli, u částic vznikají mag. síly. Částice pak migrují a splývají do magnetických pólů nebo ferromagnetických drátů.

Běžná mag. separační zařízení jsou omezena jen na oddělení silně magnetických materiálů, jako je železo a magnetit. Vysoce magnetické separátory jsou schopné oddělit i velmi slabě paramagnetické částice.^[15]

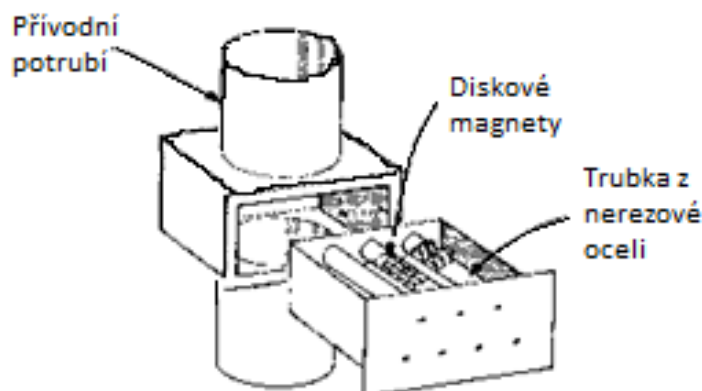


Obrázek 5 Magnetický separátor typu Kolm - překresleno podle ^[15]

2.2.4. Rozdělení mag. separátorů

Roštové separátory

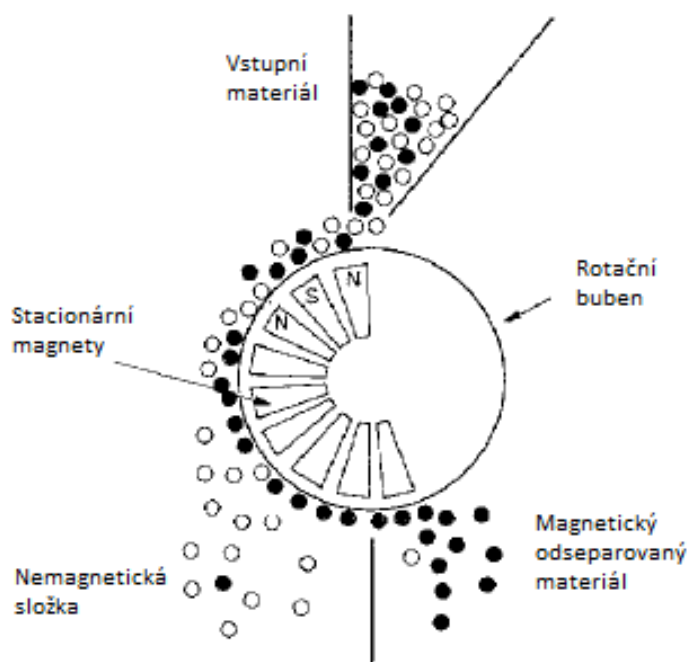
Jednoduchý a velmi běžný typ magnetického separátoru je znázorněn na obr. 6. Separátor se skládá z řady trubek umístěných v potrubí, přes které prochází vstupní materiál. Trubky, často z nerezové oceli, jsou v separátoru umístěny spolu s disky nebo krátkými střídavě magnetizovanými tyčemi, které vytvářejí radiální magnetické pole, jak je uvedeno na obr. 6. Zařízení tohoto typu se běžně používají pro oddělování železitých částic uvnitř potrubí. Separátor musí být pravidelně ručně čištěn. ^[15]



Obrázek 6 Roštový typ mag. separátoru - překresleno podle ^[15]

Bubnové separátory:

Tyto separátory jsou používány k oddělení méně magnetických železitých rud. Bubnové separátory se mohou používat jak v suchém, tak i v mokré prostředí. Tyto separátory mohou používat buď trvalé magnety, nebo elektromagnety a pracovat v nepřetržitém režimu.

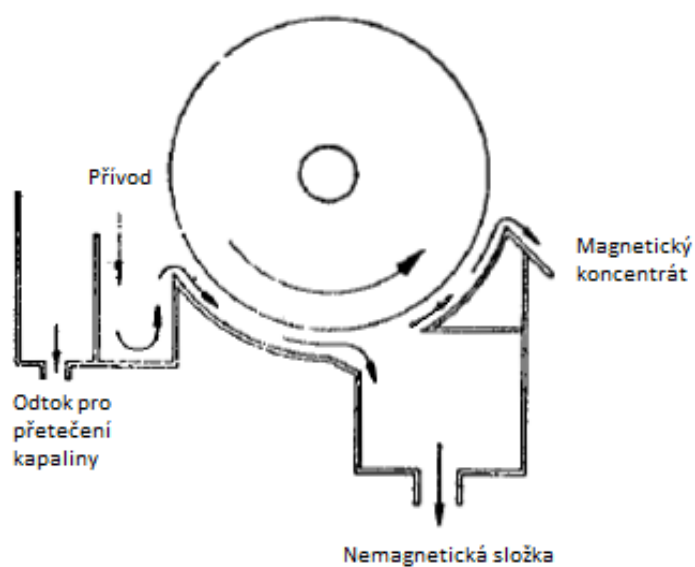


Obrázek 7 Schematické znázornění suchého bubnového separátoru - překresleno podle ^[15]

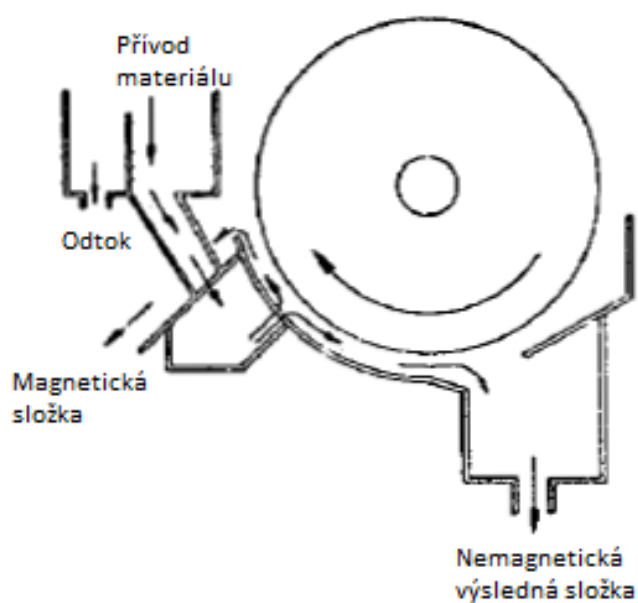
Suchý vstupní materiál je vhozen na jednu stranu bubnu nebo na kladku v závislosti na relativní velikosti magnetické, odstředivé, nebo gravitační síly. U těchto zařízení vzniká meziprodukt. Meziprodukty jsou méně přitahovány magnetickou silou než koncentrát mag. částic, a proto jsou shrnovány do zásobníku. Tyto meziprodukty jsou složeny z částic obsahující jak magnetické a nemagnetická částice. Výkonnost těchto separátorů je silně ovlivněna vlhkostí vstupního materiálu.

[15]

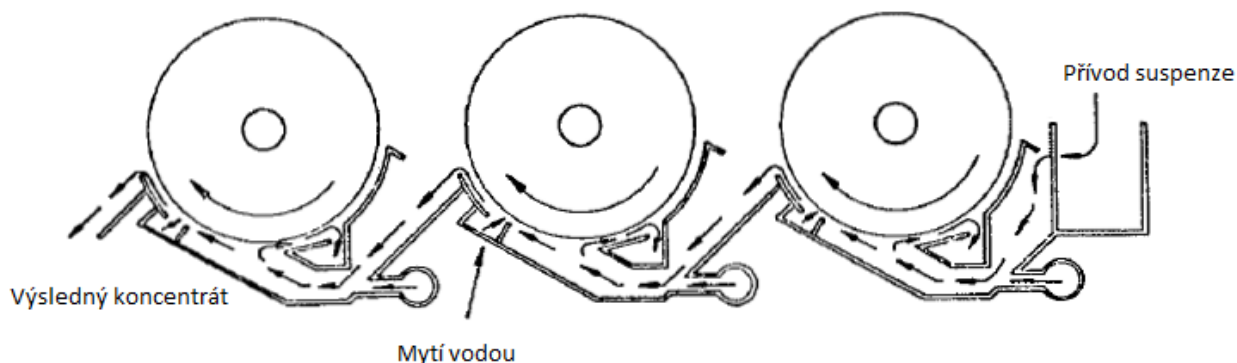
Existují tři hlavní typy mokrých bubnových separátorů: souběžné, protiběžné, a protiproudové typy.



Obrázek 8 Mokrý souběžný bubnový separátor - překresleno podle^[15]



Obrázek 9 Protiběžný separátor - překresleno podle^[15]

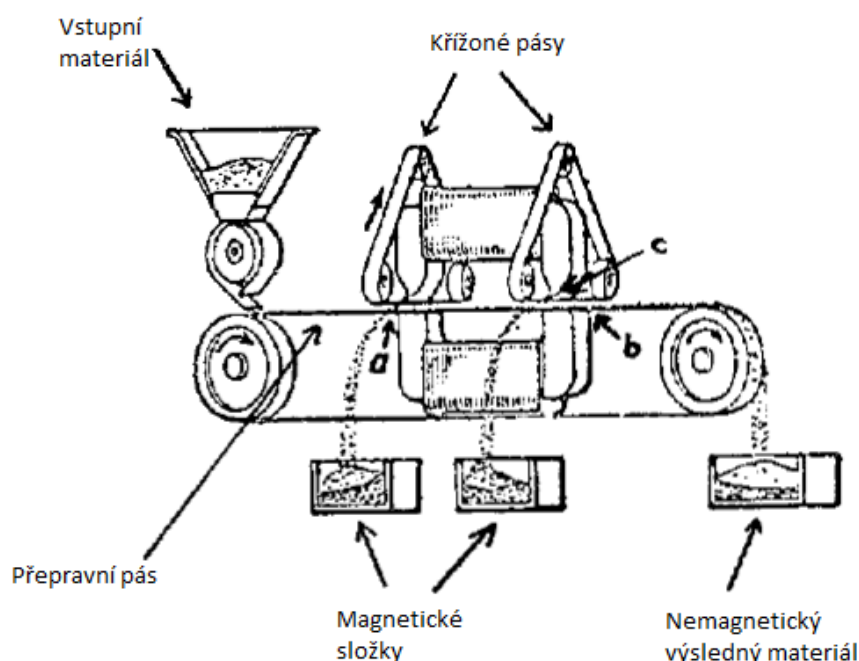


Obrázek 10 Protiproudový separátor - překresleno podle^[15]

Magnetické částice jsou přitahovány k rotujícímu povrchu nemagnetického bubnu, ve kterém jsou uvnitř stacionárních magnety. Nemagnetické částice klesají na nejnižší bod v korytu a jsou vyplavovány hlušinou.^[15]

Pásové magnetické separátory

U těchto separátorů jsou používány pásy pro dopravu vstupního materiálu do magnetického pole a při dopravě výstupního materiálu. Na levé straně rozdělovače vstupní materiál padá do přepravního pásu, který se pohybuje rychlostí až 100 cm/s. Magnetické (bod **a**) a méně magnetické částice (bod **b**) jsou přitahovány z podávacího pásu a shazovány na stranu do zásobníků pomocí kotoučů zavěšených nad pásem, proti kterému je magnetický materiál přitahován (bod **c**) nebo magnetický materiál může být přitahován k magnetu a ručně odstraněn, což je ale pracné a časově náročné. U mokrých pásových separátorů je vstupní materiál v suspenzi zaveden na pás, na jehož povrchu drží částice magnetické síly a přepravují mimo separátor.^[15]



Obrázek 11 pásový separátor – překresleno podle^[15]

2.2.5. Firmy zabývající se výrobou magnetických separátorů

V České republice existuje hned několik společností na výrobu separátorů, patří mezi ně MAGSY, s.r.o. ze Zlína, která se kromě separátorů zabývá výrobou magnetů, magnetických folií, čoček, lišt, tabulí aj. Co se týká samotných separátorů, nabízí typy pro odlučování tekutých nebo suchých směsí s ručním nebo automatickým čištěním, deskové magnetické separátory nebo separátory kovů nad pásový dopravník, ale také i magnetické separátory nemagnetických kovů.^[16]

Další firma magnetů a magnetických separátorů ze Zlína je Jelínek – Trading spol. s.r.o. Vyrábí potrubní separátory magnetických kovů (viz. Obr. 12), které jsou speciálně vyvinuty pro separaci Fe kovů z kapalin. Jsou to výrobky na základě požadavků potravinářského průmyslu. Vnitřní strana je jemně vyleštěna, bez výstupků, koutů a výklenků. Separátory jsou vyrobeny z nerezového materiálu 1.4301. Filtr je osazen velmi silnými magnety na bázi vzácných zemin NdFeB.

Také vyrábějí magnety nad dopravník nebo do násypky a výsuvné magnetické separátory. Odlučovače zachycují magnetické kovy v proudu sypaných materiálů od prášků

až po velikost částice cca 10 mm (záleží na třech rozměrech a měrné hmotnosti). Vlastní magnety jsou kryty v nerezovém pouzdře. Při čištění se mřížka vysune a vytáhne se z ní magnetické jádro. Kovové částice pak samy odpadnou.^[17]



Obrázek 12 Potrubní separátor od firmy Jelínek – Trading^[17]

SELOS Bohemia, s.r.o. je brněnská společnost na výrobu magnetických separátorů. Tyto separační přístroje jsou používány v průmyslu, u nežádoucích feromagnetických částic v tuhých nebo kapalných látkách, v potravinářství a farmaceutickém průmyslu, ale také při odpadovém zpracování (viz. obr. 13). Společnost také dodává separátory neželezných kovů. Ty pracují na principu různého působení vířivých proudů na materiály s různou elektrickou vodivostí.^[18]



Obrázek 13 Pásový separátor při zpracování odpadů^[18]

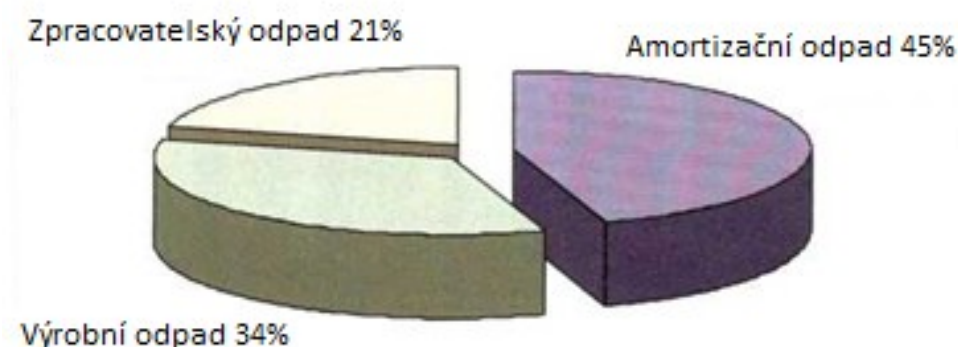
2.3. Hutnický odpad

Průmyslovou činností vznikají vedle požadovaných předmětů a materiálů i vedlejší produkty, které nemají přímé upotřebení - odpady. Z jiného úhlu pohledu lze odpadem nazvat ty produkty, které společnost nebo výrobce neumí vřadit do koloběhu upotřebitelnosti. Nelze opomenout ani skutečnost, že i původní žádoucí předměty výroby se stávají po čase nepoužitelné a stávají se odpadem.

Podle Basilejské úmluvy lze za odpad považovat látky nebo předměty, které jsou odstraňovány, nebo se uvažuje o jejich odstranění a jejichž odstranění je požadováno podle ustanovení národních zákonů. ^[19]

Jiným způsobem se odpad definuje: „Odpad je věc, které se chce její majitel zbavit, nebo též movitá věc, jejíž zneškodnění je nutné z hlediska péče o zdravé životní podmínky a ochranu životního prostředí. Odpadem je také movitá věc, která se pro vlastníka stala nepotřebnou a vlastník se jí zbavuje s úmyslem ji odložit, nebo která byla vyřazena na základě zvláštního právního předpisu.“ ^[20]

Výrobní a zpracovatelské odpady mohou být tuhé, kapalné i plynné. Amortizační kovonosný odpad je až na výjimky tuhého skupenství. Tuhý kovonosný odpad vznikající ve výrobní, zpracovatelské nebo spotřební sféře se zahrnuje do společné skupiny s označením šrot. Jeho celosvětová produkce např. koncem 90. let dosahovala více než 420 Mt ročně, Podíl jednotlivých druhů šrotů v celosvětovém měřítku je znázorněn na obr. 13. ^[19]



Obrázek 14 Rozdělení světové produkce šrotu - překresleno podle ^[19]

2.3.1. Recyklace odpadů v hutním závodě

Suroviny, paliva a různé přísady obsahují škodlivé látky, které nepřecházejí do výrobku a jsou zachycovány při čištění plynů a vod, nebo přímo v rafinačních technologiích (strusky). Další škodlivé látky vznikají při chemických a fyzikálních procesech jednotlivých technologií. Nedokonalost technologických postupů je příčinou, že při čištění se zachytává i značné množství užitečného kovu. Je přirozenou snahou vrátit užitečný kov zpět do technologického cyklu a škodliviny koncentrovat v množství a formě, která dovoluje jejich zpracování v huti, nebo v jiných oborech průmyslu. Látky, které jsou v jednom oboru škodlivinou, jsou v jiném oboru základní surovinou, např. neželezné kovy v oboru hutnictví železa a naopak.

Recyklace plyných škodlivin se provádí buď změnou jejich skupenství (např. transformací oxidů síry na sádro), nebo změnou jejich formy na méně škodlivou (dospálení CO a uhlovodíků na CO₂ a vodní páru). Přitom se získává určité množství tepla, což má sekundárně další kladný vliv na životní prostředí. Klasickým příkladem recyklace spalin je v poslední době zaváděná recyklace aglomeračních spalin. Recyklací spalin dojde nejen k dospálení značného množství CO, ale i ke snížení obsahu prachu a jiných škodlivin. Využije se i tepelného obsahu spalin.

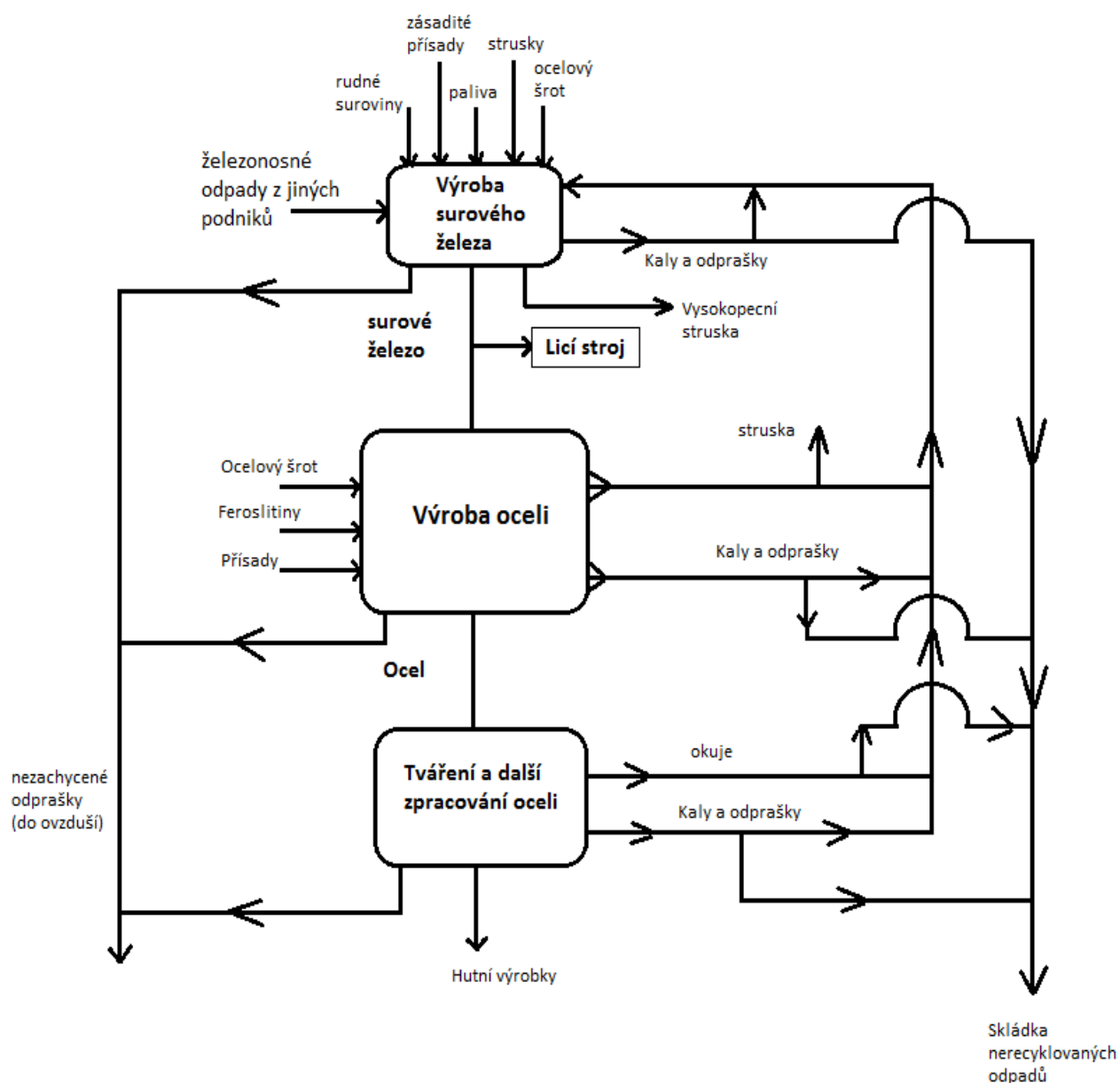
Hutnictví je mimořádně náročné na spotřebu vody. Při chlazení, čištění plynů, nebo při technologických operacích se voda znečišťuje a musí se proto upravovat. Hutní podnik má obvykle centralizované vodní hospodářství, které upravuje vodu k recirkulaci podle požadavků jednotlivých technologií, nebo ji vyčistí tak, aby splňovala podmínky pro vypouštění do vodních toků.

Největším problémem hutnické výroby jsou tuhé odpady. Vznikají většinou v technologickém cyklu (strusky), nebo při čištění odpadních plynů a vod (odprašky a kaly). Strusky s obsahem užitečného kovu (železa) se částečně vracejí na začátek technologického cyklu, ale jsou také využívány většinou ve stavebnictví. Ostatní kovonosné odpady se většinou používají při výrobě daného kovu, lze je tedy považovat za druhotné suroviny. Takto se v hutnictví využívají i odpady z jiných průmyslových odvětví, jako je strojírenství, chemie apod. Využívat tímto způsobem se však dají jen odpady, které obsahují určité množství škodlivých látek pro proces výroby daného kovu. Nevhodné odpady se proto skladují na skládkách nerecyklovatelných odpadů, které

představují další zdroj znečišťování vzduchu a vod. Odpadů na takových skládkách je v České republice obrovské množství a stále se zvětšuje.

Suroviny dovážené do podniku představují i neustálý přísun škodlivých látek při výrobě železa a oceli. Jedná se hlavně o neželezné kovy, síru, fosfor, alkálie atd. Při úplné recyklaci odpadních látek by množství těchto látek uvnitř technologického cyklu neustále rostlo, což není možné. Proto jsou tyto látky ukládány na skládky nerecyklovatelných odpadů. Toto řešení však už v současnosti nevyhovuje. Je proto potřeba instalovat speciální technologie, které separují železonosnou část odpadu a neželezné kovy, případně jiné látky koncentrují v takové míře, že jsou využitelné v příslušném odvětví průmyslu. Takové technologie jsou však zatím nedokonalé a velmi nákladné. ^[21]

Zjednodušený pohled na koloběh a distribuci škodlivin v hutnictví je znázorněn na obr. 15.



Obrázek 15 Schéma vzniku vedlejších produktů při výrobě železa a oceli - překresleno podle ^[21]

2.3.2. Popis jednotlivých hutních odpadů

Odprašky

Vznikají při výrobě nebo sekundárním zpracování železa a oceli ve formě tuhých částic unášených ve spalínách. Odprašek z chemického ohřevu má charakter jemnozrnného prachu šedohnědé barvy, který vzniká při ohřevu. Tento odpad patří do kategorie nebezpečných odpadů. Spaliny, které jsou odsávány z prostoru mezi agregátem a zpracovávanou taveninou, jsou filtrovány v látkových filtrech.

Tyto odprašky jsou odsávány společně s odprašky z přelévání surového železa. Odsávané spaliny jsou čištěny v látkových filtrech a odprašky zachycené ve filtrech se poté shromažďují v zásobnících. Tento typ odprašku tedy vzniká v důsledku společného odsávání spalin vznikajících při různých metalurgických procesech.^[22]

Odprašky z elektrostatických odlučovačů z výroby aglomerátu

Jsou produkovány řádově desítky tisíc tun odprašků z elektrostatických odlučovačů za rok. Jedná se o prachové částice s výrazným podílem frakce o velikosti menší než 0,125 mm. Vysoký obsah železa předurčuje jejich další použití. Vracejí se zpět do výrobního cyklu přímo na aglomeraci. Mezi problémové prvky odprašků patří Pb, Cd a Zn, F, S.

Tabulka 1 Průměrné složení odprašků

Látka	Množství vyjádřené v %
Fe	46,7
FeO	6,5
Fe ₂ O ₃	57,5
SiO ₂	9,39
S	0,22
Al ₂ O ₃	0,94
Mn	0,4
MgO	2,45
CaO	8,91
Cr	0,009
As	0,001
Pb	0,0045
Cd	0,0015

Z porovnání složení aglomeračních odprašků odebraných v různých provozech a různých časových obdobích vyplývá, že mohou obsahovat výrazně větší koncentrace Pb (0,18 hmot. %), Cd (21,5 mg.kg⁻¹), Cr (191 mg.kg⁻¹), As (37 mg.kg⁻¹) a Hg (2,2 mg.kg⁻¹).^[19]

Výroba aglomerátu na spékacích pásech byla původně určena hlavně pro zpracování jemnozrnných odpadních látek s obsahem železa. Postupně se k rudným surovinám přidávaly další kaly a odprašky, a odstraňování škodlivých (technologicky) látek při procesu spékání bylo považováno za největší výhodu této technologie. Příslušné škodliviny byly z velké části převáděny na plynnou formu a vypouštěny do ovzduší. Stupňující se důraz na ochranu ovzduší tuto zdánlivou výhodu změnil na největší nevýhodu. Aglomerace se stala jedním z největších znečišťovatelů ovzduší a možnost zpracování prachových odpadů na aglomeračních pásech je v současnosti limitována mírou přechodu škodlivých látek do ovzduší. Nemělo by se však zapomínat, že základní účel, zpracování jemnozrnných odpadů je z ekologického hlediska pozitivní. Se zvyšováním podílu recyklovaných odpadů v aglomeračním procesu se však zvyšuje i míra znečišťování ovzduší.

Zvyšováním účinnosti čištění aglomeračních spalín dochází k paradoxní situaci, že vzniká nový, nebezpečný odpad, tvořený nejjemnějšími částicemi zachycenými v posledních komorách elektrostatických odlučovačů prachu. Tento odpad nejde recyklovat a musí se vyvážet na speciální skládku. Při výrobě aglomerátu v České republice vzniká ročně více než 3000 tun takového nerecyklovatelného materiálu.^[23]

Vysokopecní prach a vysokopecní kaly

Vysokopecní prach (VPP) pochází ze suchého, kaly z mokrého čištění vysokopecního plynu (VPK). Výrobní agregáty jsou většinou vybaveny vzducho-technickým zařízením k zachycování prachu z vypouštěných spalín.^[19]

Kaly jsou odvodňovány v kruhových zahušťovačích a pak buď čerpány na odkaliště, nebo znovu odvodněny v kalolisech. Po neutralizaci nehašeným vápnem a homogenizaci mohou být dále využity v aglomeraci. Toto je možné za předpokladu,

že nebudou překročeny limitní obsahy Zn, Pb a dalších škodlivin při výpočtu složení vsázky do vysoké pece. Těchto kalů je možno zpracovat pouze část a zbytek se ukládá na skládky. Dříve byly pro tyto kaly využívány buď nerovnosti terénu nebo uměle vytvořené odkaliště z hrází budovaných ze strusky a nepropustných jílu. V současnosti je možné tyto kaly ukládat pouze na zabezpečené

sklárky s

Tabulka 2
vyjádřené v

Látka	Množství vyjádřené v %
Fe	36,45
Mn	0,45
Pb	0,011
Cr	0,029
Cd	0,001
Zn	0,053
Cl	0,59
Cd	0,001

fólií a monitoringem.^[21]

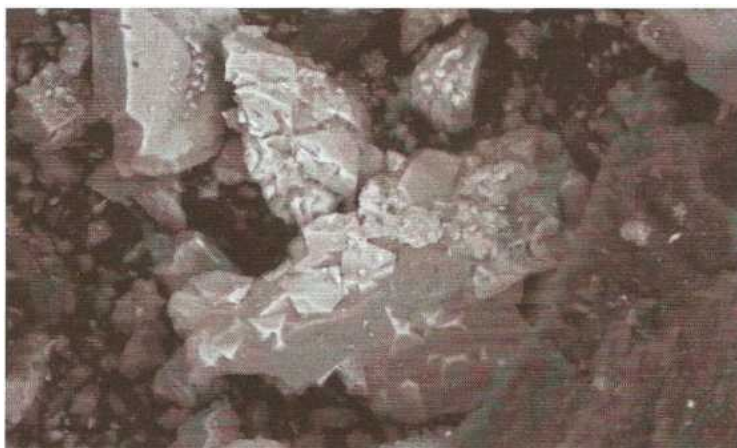
Průměrné složení vysokopecních prachů
hmot. %.

Tabulka 3 Průměrné složení vysokopecních kalů vyjádřené v hmot. %.

Látka	Množství vyjádřené v %
Fe	38,6
Mn	0,37
Pb	0,121
Cr	0,017
Cd	0,006
Zn	0,64
Cl	0,035
Cd	0,001

Z přehledu chemického složení vyplývá, že odpady z vysoké pece obsahují nezanedbatelné množství Zn a Pb. S vysokým obsahem Zn a Pb se řadí mezi nebezpečné odpady. S ohledem na množství vznikajících odpadů není zanedbatelný ani obsah prvků řádově v setinách procenta (např. Cd, Cr). Oba druhy odpadů obsahují v průměru vysoké množství Fe a recyklují se. Vysokopecní prach je součástí aglomerační vsázky, vysokopecní kaly jsou součástí vysokopecní vsázky. Tím se uzavírá jeden z cyklů toku škodlivin v hutním podniku.

Vysokopecní prach obsahuje převážně částice menší než 0,1 mm, pouze cca 25 hmot. % částic je z intervalu 0,1 - 0,5 mm. V důsledku průchodu elektrofiltry se navíc stávají vysoce hydrofobními. ^[19]



Obrázek 16 Snímek vysokopecních kalů, zvětšení 800x ^[19]

Ocelářenské prachové úlety a kaly

Suchým čistěním odpadních plynů z oceláren vznikají prachové úlety - odprašky a mokrým čistěním kal. Průměrné složení ocelářenských odprašků, jemných a hrubých kalů z různých ocelářenských procesů uvádí tab. 4.

Tabulka 4 Průměrné složení ocelářenských odprašků (OO) a kalů – jemných (OKJ) i hrubých (OKH) vyjádřené v hmot. %.

Odpad	Fe	Mn	Zn	Pb	Cd	Cu	Cr	Ni	S
OO	20,9	0,34	21,5	4,29	0,19	0,31	0,18	0,027	5,18
OKH	75,4	0,91	0,15	0,028	0,001	0,0024	0,071	0,015	0,093
OKJ	61,6	1,30	0,73	0,15	0,004	0,024	0,067	0,064	0,130

Ocelářenské odprašky představují prach s vysokým obsahem Zn (řádově až desítky hmot. %), Pb 5 hmot. %) a nezanedbatelným obsahem Cd, Cu i Cr.

Hrubé i jemné ocelářenské kaly obsahují 60 - 80 hmot. % Fe. Hrubé kaly přitom obsahují výrazný podíl kovového Fe s rozhodujícím podílem částic z intervalu 0,1 - 0,5 mm. Jemné konvertorové kaly jsou pastovitého charakteru s rozhodujícím podílem frakce do 0,1 mm. Obsahy škodlivin v ocelářenských kalech jsou obvykle nižší než

v ocelářenských odprašcích. Z důvodů vysokých podílů neželezných kovů jsou jako součást vysokopevní vsázky nepoužitelné.



Obrázek 17 Snímek částic jemných ocelářenských kalů, zvětšení 30x[19]

Ze snímků ze skenovacího elektronového mikroskopu vyplývá, že kaly obsahují částice různého tvaru i složení, přičemž na větších částicích jsou zachyceny nejjemnější podíly.^[19]

3. Praktická část

3.1. Popis použitých přístrojů

3.1.1. Teslametr s Hallovou sondou Elimag MP-1

Tento přístroj sloužil k naměření magnetického pole cívky mag. separátoru.

Charakteristika přístroje^[24]

Elimag MP-1 je ruční elektronický přístroj sloužící k přesnému měření stálé či pomalu se měnící hodnoty magnetické indukce ve vzduchu pomocí Hallovovy sondy. Zpracování měřených dat je plně digitální, řízené jednočipovým mikroprocesorem.

Podle použité sondy přístroj může měřit v jedné, dvou nebo třech osách. Přístroj je dále vybaven velkým grafickým displejem.

Použití

Může sloužit k měření magnetické indukce homogenního nebo nehomogenního magnetického pole. Tímto způsobem lze měřicí přístroj použít např. pro:

- měření magnetického toku
- kontrolu kvality permanentních magnetů
- kontrolu úplné demagnetizace rozličných kovových předmětů
- kontrolu kvality součástí z měkkých magnetů (např. částí relé atd.)



Obrázek 18 Teslametr s Hallovou sondou Elimag MP-1^[24]

3.1.2. Microsense Magnetometer EV9 Vibrating Sample

Magnetometr sloužil k měření magnetických vlastností jednotlivých zkoumaných látek (viz. Charakteristika zkoumaných materiálů).

Charakteristika přístroje^[25]

Tento magnetometr může dosahovat magnetického pole až 26 kOe (oersted) ve vzorkovacím prostoru 5 mm. Měření je prováděno za pomoci dodaných vzorkovnic, které jsou určeny pro všechny typy vzorků. Nastavení teploty je možné v rozsahu od 4.2K až 1050K. U MicroSense systému je teplota vzorkovací komory přizpůsobena na základně používaného magnetu. Nejvyšší magnetické pole je 2.15T. Magnetometr má nízkou hlučnost.

Použití

- Magnetometr může měřit vzorky ve formě tuhé látky, kapaliny nebo prášku.
- Ideální volbou jsou vzorky s nízkým magnetickým momentem.



Obrázek 19 Microsense Magnetometr EV9 Vibrating Sample^[25]

3.1.3. Elektronový mikroskop Quanta 650 FEG

Toto zařízení sloužilo pro pozorování kalových částic.

Charakteristika zařízení^[26]

Elektronové rastrovací mikroskopy Quanta podporují technologii ESEM. Jsou určeny pro generování a snímání všech dostupných informací z jakéhokoli typu vzorku. Quanta 650 je vysokorozlišovací nízkovakuový FEG systém pro náročné vzorky a dynamické experimenty.



Obrázek 20 Elektronový mikroskop Quanta 650 FEG^[26]

3.1.4. Laboratorní zdroj HY1803D

Přístroj sloužil k regulovanému napájení cívky laboratorního magnetického separátoru.

Charakteristika

- plynule regulované napětí 0 – 18V
- plynule regulovaný proud 0 – 3A
- přesnost měření 1,5% + 2digit
- rozměry 230 x 160 x 95mm

- váha 4kg



Obrázek 21 Laboratorní zdroj HY1803D

3.1.5. Spektrální fotometr Spekol 1

Fotometr sloužil k posouzení průsvitnosti u měřených vzorků.



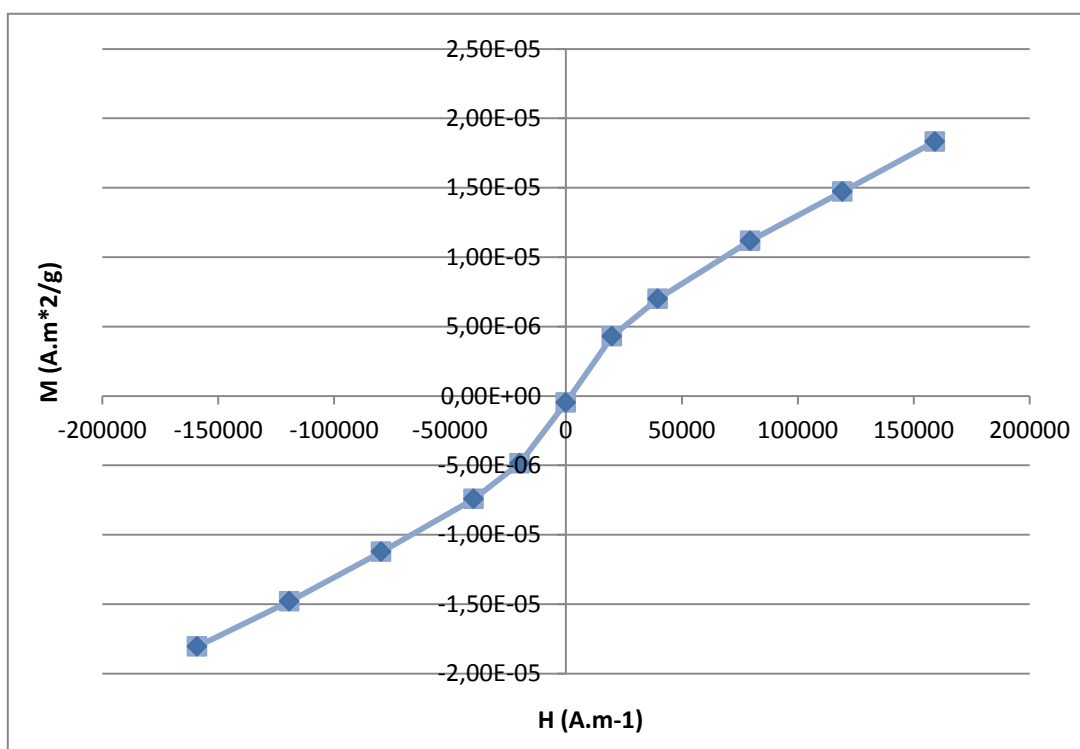
Obrázek 22 Spektrální fotometr Spekol 1

3.2. Charakteristika zkoumaných látek

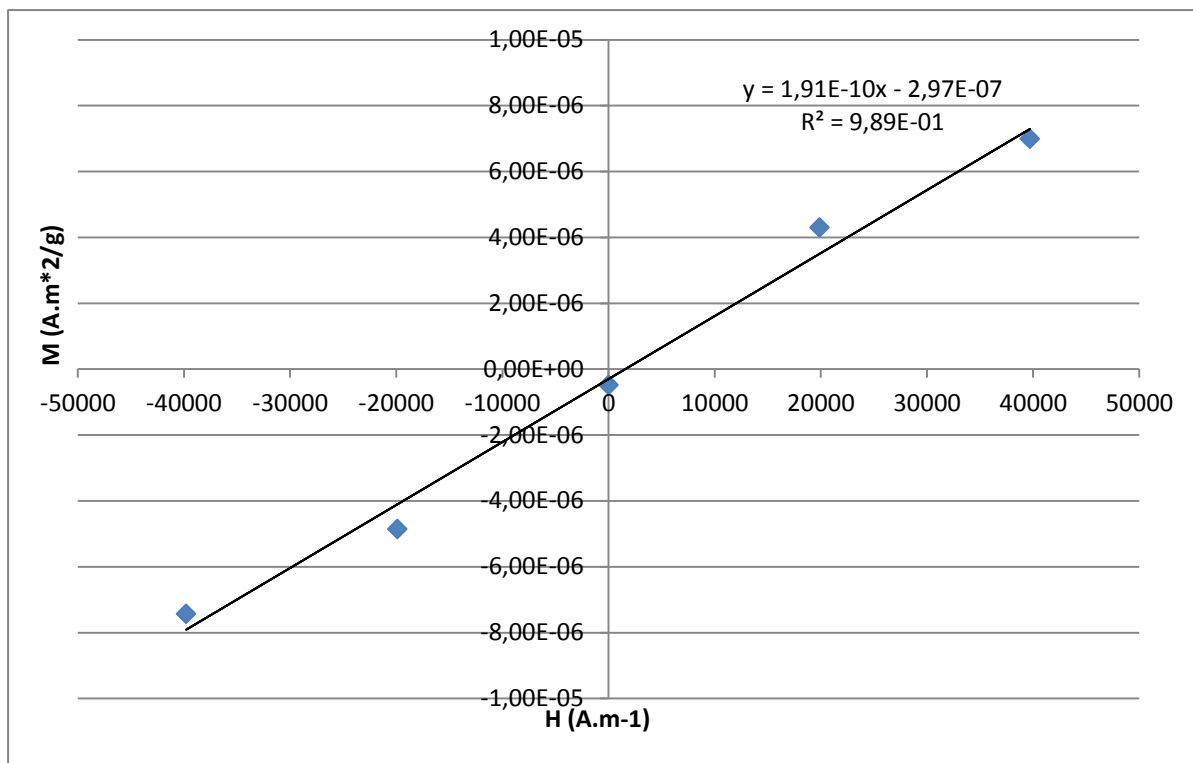
V této kapitole jsou uvedeny materiály, které sloužily pro testovací a výslednou separaci. Je zde stručný popis spolu s naměřenými magnetickými vlastnostmi jednotlivých materiálů. Magnetické vlastnosti byly měřeny ve formě hysterezních křivek, které vyjadřují závislost materiálu na magnetizaci M a intenzitě mag. pole H , a ve formě magnetických susceptibilit. Údaje byly zjišťovány za pomoci magnetometru EV9 od firmy Microsense.

3.2.1. Bentonit

Bentonit je hornina na bázi jílu. Hlavním minerálem je montmorillonit, ve kterém je vázána voda. Struktura montmorillonitu je tvořena z vrstev křemičitanů kovů s pravidelně vestavěnými ionty OH. Sodný bentonit se používá jako nejvhodnější pojivo pro peletizaci.^[21]



Obrázek 23 Magnetizační hysterezní křivka u bentonitu

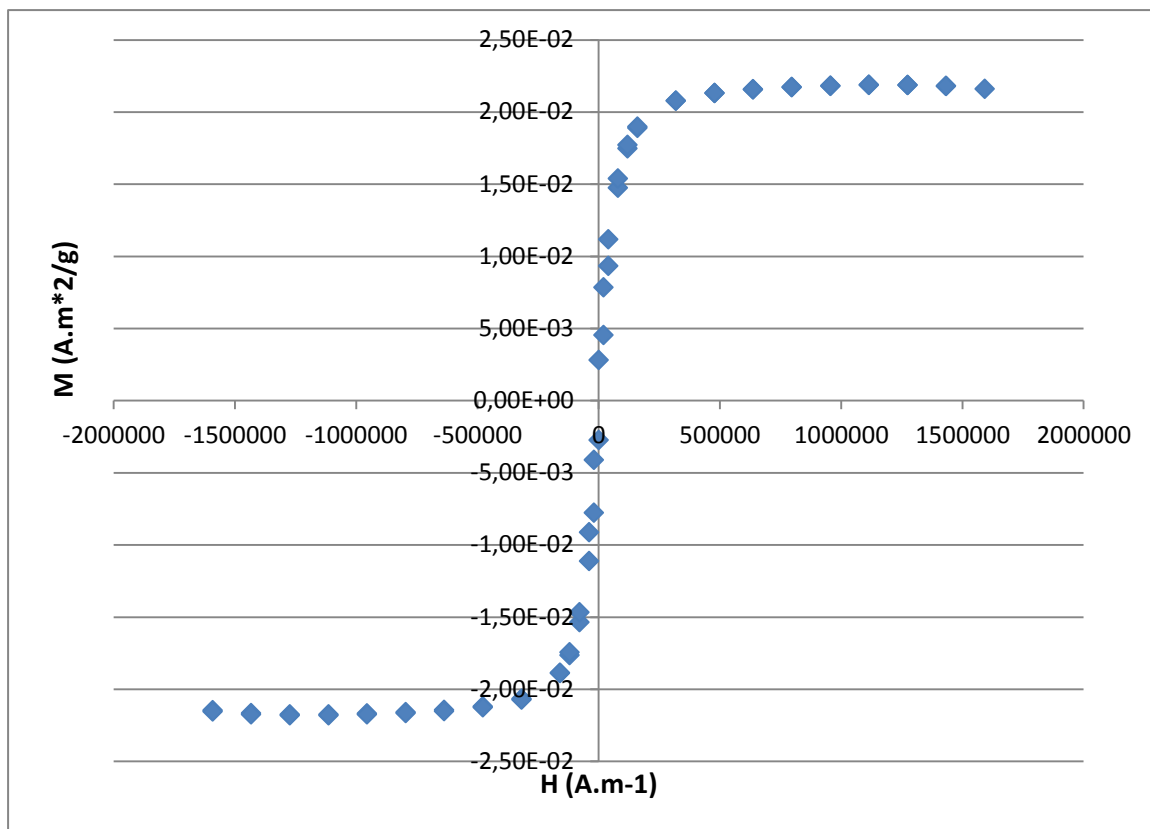


Obrázek 24 Magnetizační hysterezní křivka s rovnicí susceptibility u bentonitu

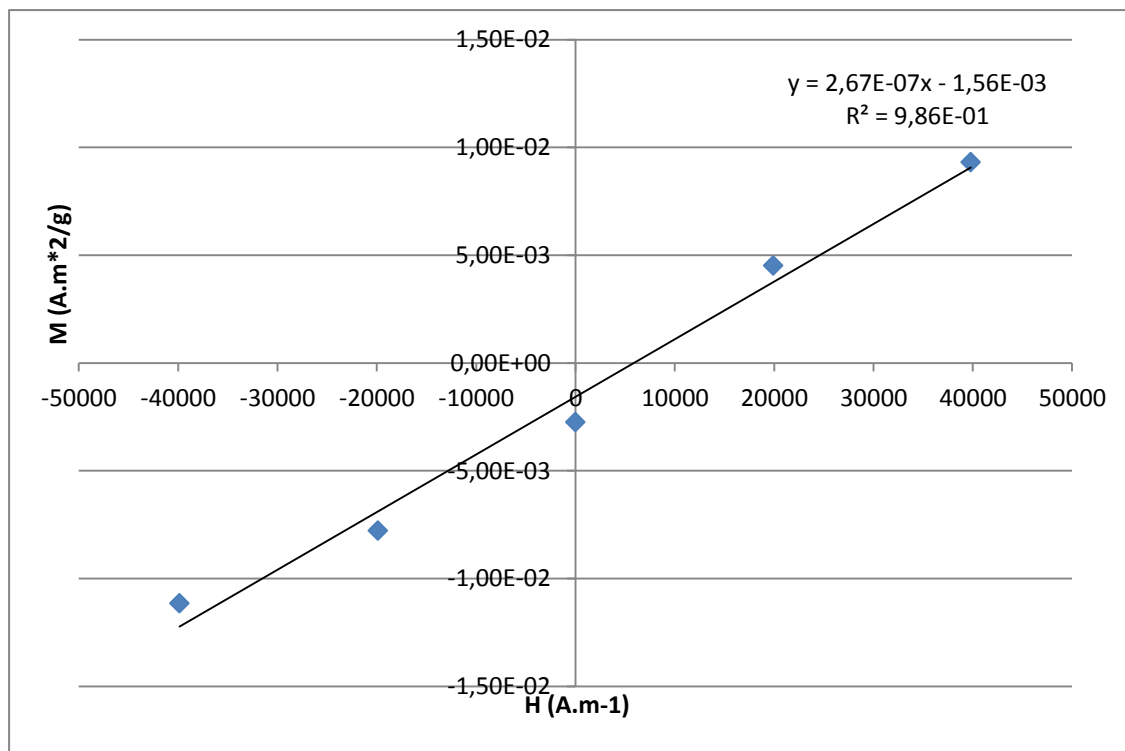
3.2.2. Magnetit Fe_3O_4

Tato ruda patří mezi nejstarší známé magnetické materiály. Zrnité agregáty se vyskytují často ve velkém množství jako ruda. Barva je železně černá. Krystaly jsou přitahovány magnetem jako měkké železo, kusové masy působí samy jako magnet. Jako jemné částčky je magnetit součástí téměř všech bazických vyvřelých hornin. ^[27]

Částice zkoumaného magnetitu měli velikost $50 \mu\text{m}$. Pro výzkum byl magnetit vybrán pro jeho silné magnetické vlastnosti.



Obrázek 25 Magnetizační hysterezní křivka u magnetitu

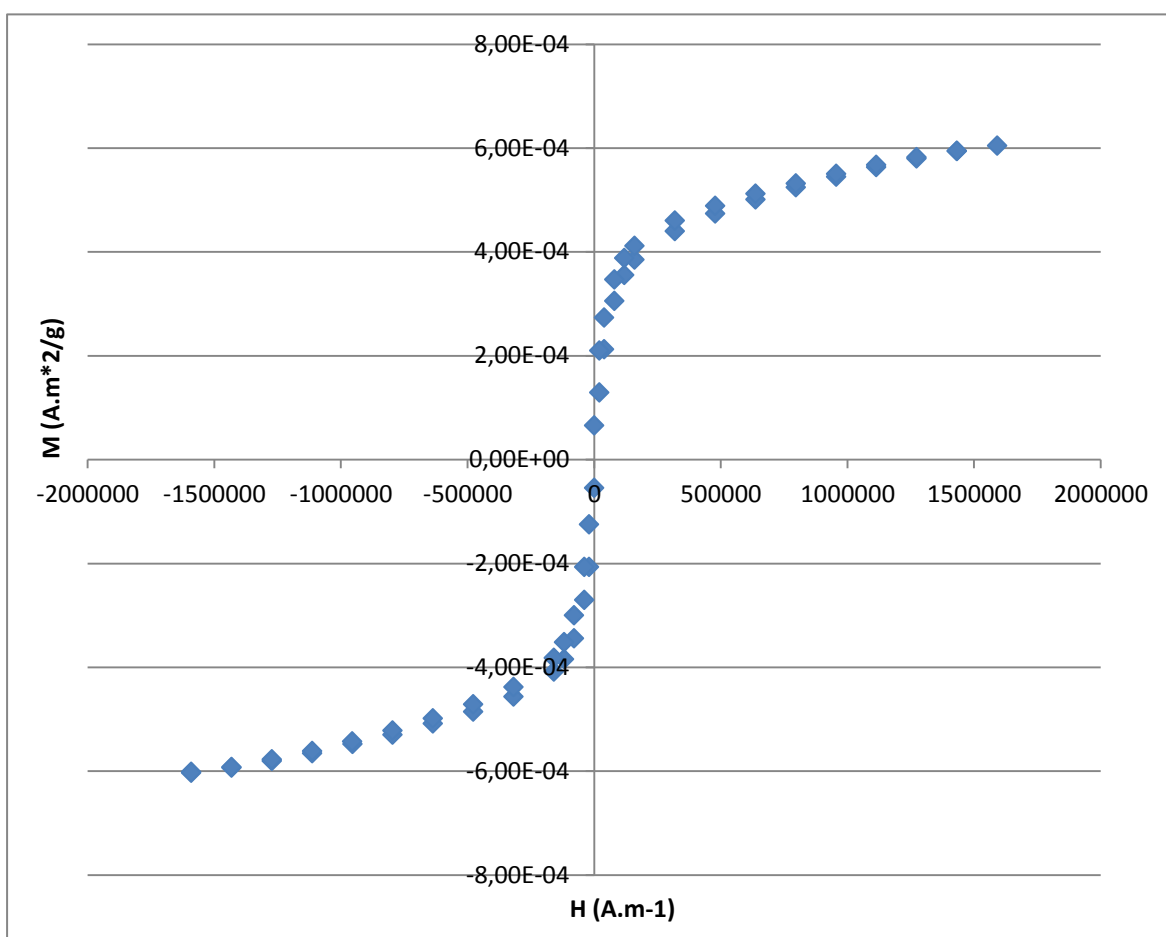


Obrázek 26 Magnetizační hysterezní křivka s rovnicí susceptibility u magnetitu

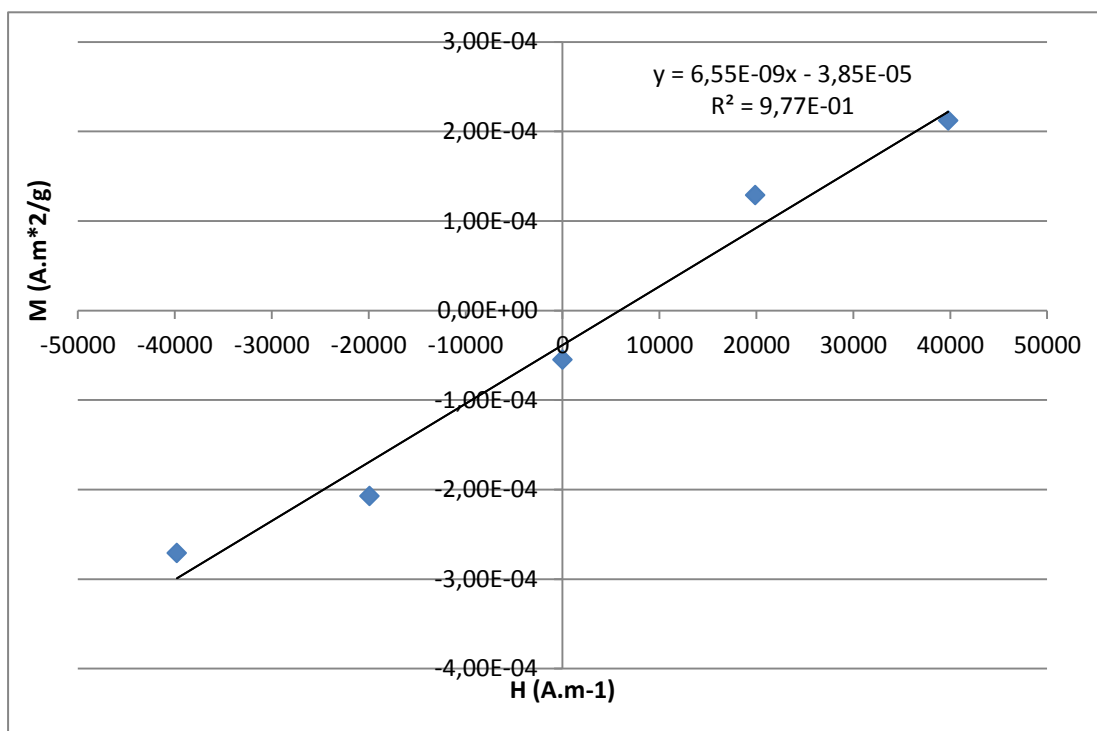
3.2.3. Směs mikročástic α - Fe_2O_3 (hematit), β - Fe_2O_3 , γ - Fe_2O_3 (maghemit)

Částice Oxidy železa patří v přírodě mezi nejčastější minerální látky a jsou často používány pro modelování agregace nanočástic. Oxid železitý je látka, která krystalizuje v několika různých modifikacích. Hematit (α - Fe_2O_3) je nejvíce stabilní forma oxidu železa. Při nízkých teplotách vykazuje antiferomagnetické uspořádání, které se při vyšších teplotách narušuje a oxid se stává feromagnetikem. Hematitové částice jsou široce používány v biologických aplikacích.^[28]

β - Fe_2O_3 je pouze syntetická fáze, která se vytváří při některých málo procesech, např. redukci hematitu uhlíkem. γ - Fe_2O_3 je fází vyskytující se v přírodě jako minerál maghemit, vzniká zvětráváním magnetitu. Dále je ferimagnetický, tepelně nestabilní (mění se na α - Fe_2O_3), velmi jemné částice (pod 10 nm) vykazují superparamagnetismus.^[29]



Obrázek 27 Magnetizační hysterezní křivka u Směsi mikročástic Fe_2O_3



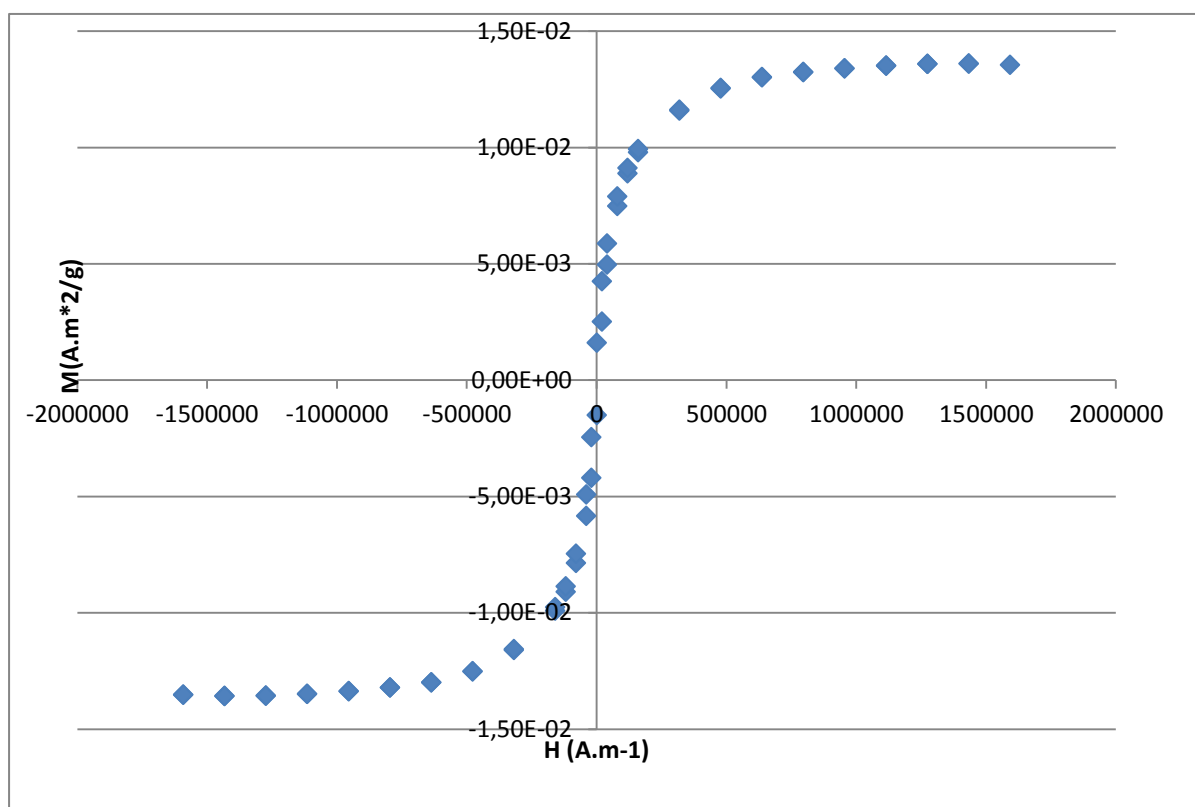
Obrázek 28 Magnetizační hysterezní křivka s rovnicí susceptibility u směsi mikročástic Fe_2O_3

3.2.4. Kal určený pro výzkum

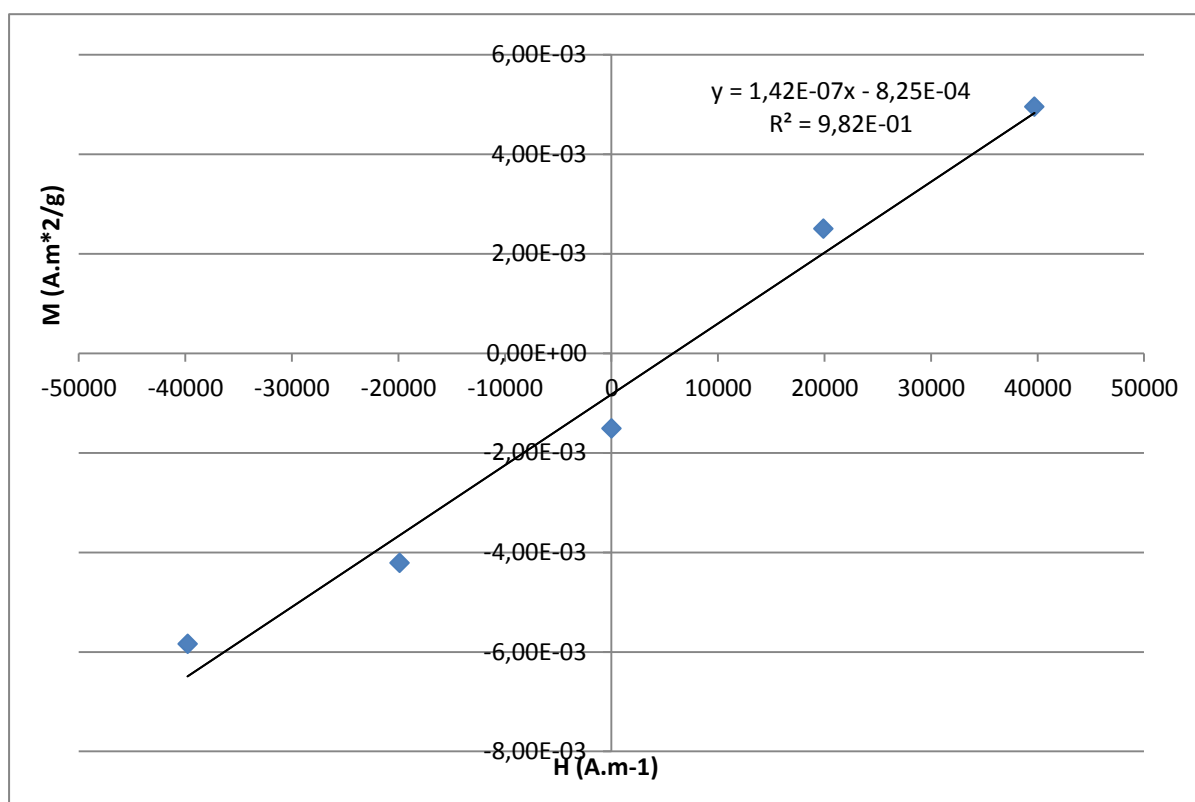
Tento jemnozrnný kal pocházející z Třineckých železáren poskytl, pan doc. Ing. Jiří Botula, Ph.D. V této látce je zastoupeno různé množství prvků magnetické i nemagnetické složky.



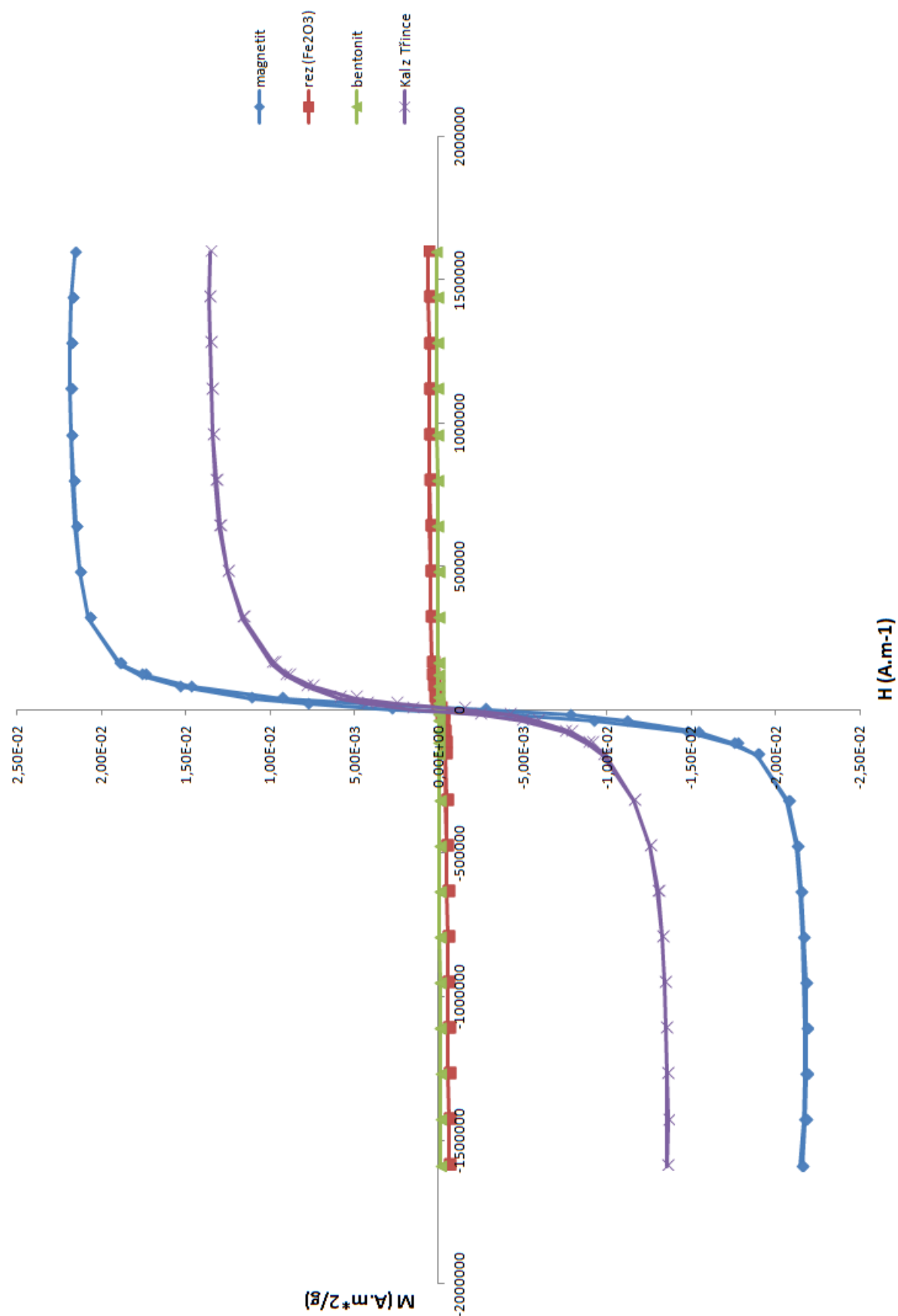
Obrázek 29 Kal z Třineckých železáren



Obrázek 30 Magnetizační hysterezní křivka u Kalu



Obrázek 31 Magnetizační hysterezní křivka s rovnicí susceptibility u kalu



Obrázek 32 Srovnání mag. hysterezních křivek u všech zkoumaných materiálů

Tabulka 5 Susceptibility u jednotlivých látek

MATERIÁL	SUSCEPTIBILITA ($\text{m}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)
Magnetit	$2,67 \cdot 10^{-07}$
Směs mikročástic Fe_2O_3	$6,55 \cdot 10^{-09}$
Kal	$1,42 \cdot 10^{-07}$
Bentonit	$1,91 \cdot 10^{-10}$

3.3. Testování mag. separátoru a separace nanočástic hutnického odpadu

V této části práce je prezentován používaný laboratorní magnetický separátor (navržený a vyrobený v institutu fyziky HGF-VŠB), jehož funkční uspořádání jednotlivých komponentů bylo navrženo a realizováno v rámci této diplomové práce. Dále je navržen způsob magnetické separace pomocí ručního pístu (injekční stříkačky). Celá navržená operace je rozdělena na tři fáze. První fáze se zabývá vizuální účinností při separaci dvousložkové směsi a to mezi bentonitem a magnetitem. Každá z těchto látek má odlišné magnetické vlastnosti (viz. Charakteristika zkoumaných látek). Úkolem druhé fáze bylo optické vyhodnocení separace magnetitu a separace směsi nanočástic Fe_2O_3 za pomoci spektrálního fotometru. Tyto dvě fáze mají za úkol otestovat účinnost magnetického separátoru a třetí fáze se zabývá separací nanočástic hutnického odpadu konkrétně kalu z Třineckých železáren.

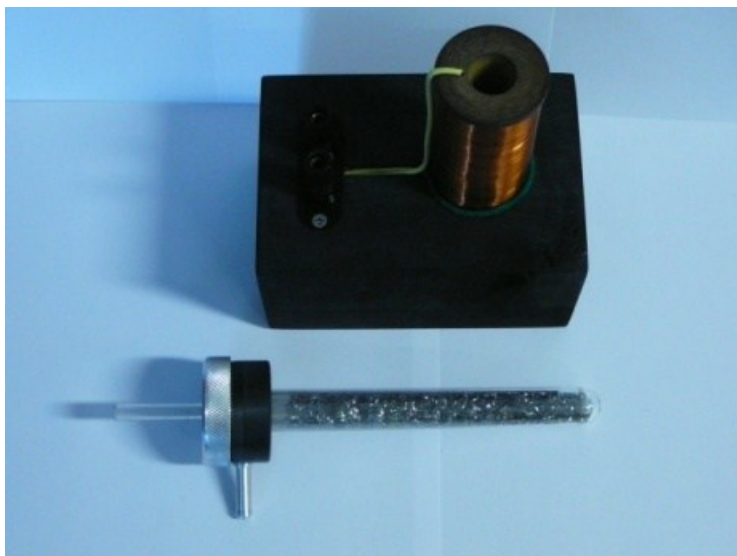
3.3.1. Popis používaného magnetického separátoru

Jedná se o průtokový separátor, u kterého je možné dosahovat vysokých gradientů magnetického pole volbou vhodného druhu ocelové vaty a separovat tak ve velmi pomalém režimu průtoku magnetické mikro a nano-částice.

Magnetický separátor se skládá z dřevěné kostry s přívodními kabely, z cívky objímající zkumavku, zkumavky obsahující ocelovou vatu a hadiček. V závislosti na rychlosti objemového průtoku a velikosti proudu procházejícího cívkou je možno zachytávat v separátoru částice s odlišnými magnetickými vlastnostmi.



Obrázek 33 Laboratorní mag. průtokový separátor



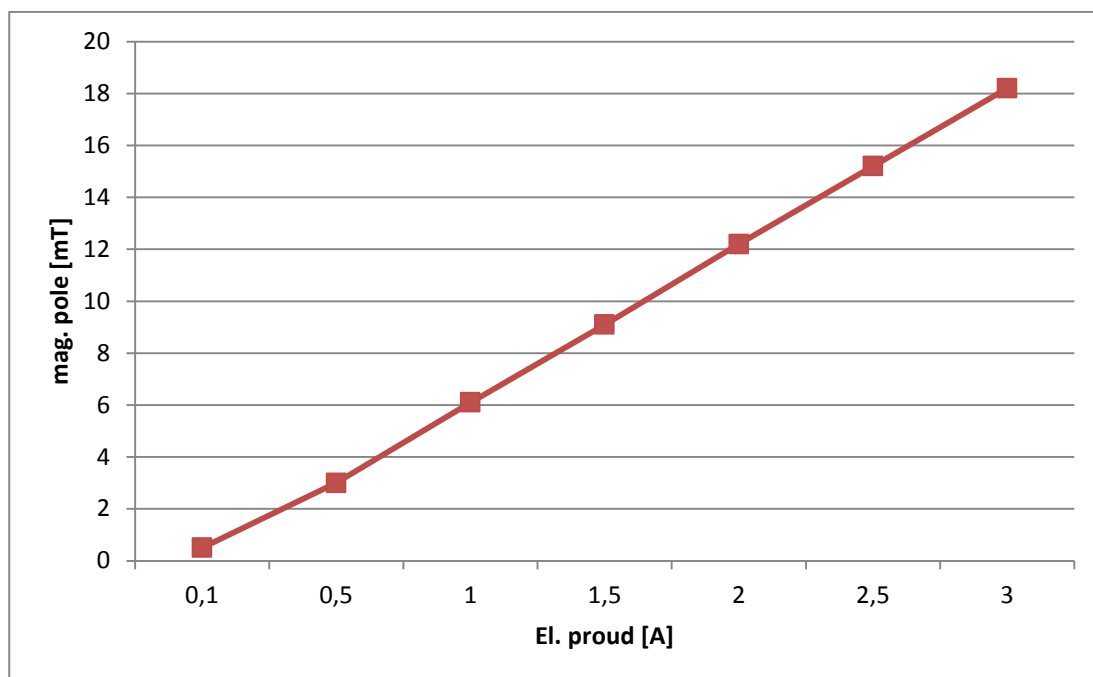
Obrázek 34 Cívka a zkumavka s ocelovou vatou

Je možné použít jakoukoliv cívku. Testovaná cívka (měděný drát 0,8 mm, 1485 závitů, 4,5 Ω) měla průměr jádra 20 mm a maximální použitý proud byl 3 A.

Na konci cívky mag. separátoru bylo pomocí teslametru s hallovou sondou Elimag MP-1 (viz. Použité přístroje) naměřeno magnetické pole při zvoleném el. proudu procházející cívkou.

Tabulka 6 Měření magnetického pole u cívky separátoru

Počet měření	El. proud [A]	Mag. pole [mT]
1	0,1	0,5
2	0,5	3
3	1	6,1
4	1,5	9,1
5	2	12,2
6	2,5	15,2
7	3	18,2



Obrázek 35 Magnetické pole na konci cívky separátoru

Toto měření prokázalo, že cívka laboratorního separátoru generuje magnetické pole. Zařízení je tedy připraveno pro zadané laboratorní operace.

3.3.2. Obecný postup magnetické separace u laboratorního separátoru:

- Prášková směs v kapalině se vnáší do separátoru pomocí plastového pístu (injekční stříkačky) vstupem v ose zkumavky (horním vstupem).
- Suspenze putuje na dno zkumavky hadičkou (po cestě ke dnu zkumavky není v kontaktu s ocelovou vatou) a následně se vrací podél stěn zkumavky nahoru k výstupu, kolem drátků z ocelové vaty. Okolo této vaty vzniká velký gradient magnetického pole.
- Odseparovaná látka následně vytéká ze separátoru do určené nádoby.
- Magnetická složka se vyplachuje po vypnutí proudu procházejícího cívkou rychlým proudem kapaliny.

Při separaci magnetických materiálů může dojít k zanesení separátoru, který se pak obtížně vyplachuje proudem vody (je nutné zkumavku rozšroubovat a vyčistit).



Obrázek 36 Celá sestava průtokového mag. separátoru

3.3.3. Fáze 1 - Testovací magnetická separace dvousložkové směsi

Roztok byl vytvořen tak, že do nádoby s destilovanou vodou o objemu 250 ml byl přidán bentonit v práškové formě o hmotnosti 3g a magnetit ve stejné formě a hmotnosti. Tento vytvořený roztok byl nasáván injekční stříkačkou o objemu 150 ml, takže nasávání se provedlo dvakrát, a vtlačován do přívodní trubice separátoru. Roztok tlakovým působením plynul přes trubici naplněnou ocelovou vlnou, která vlivem magnetické síly vyvolané cívkou separátoru oddělovala magnetit od bentonitu. Zbytek roztoku s bentonitem putoval do prázdné kádinky, zatímco magnetit zůstal v ocelové vlně. Měření probíhalo třikrát, a to podle velikosti el. proudu (v rozmezí 1, 2 a 3 A) proudícího přes cívku separátoru.

Tato separace vizuálně ověřila účinnost separátoru.

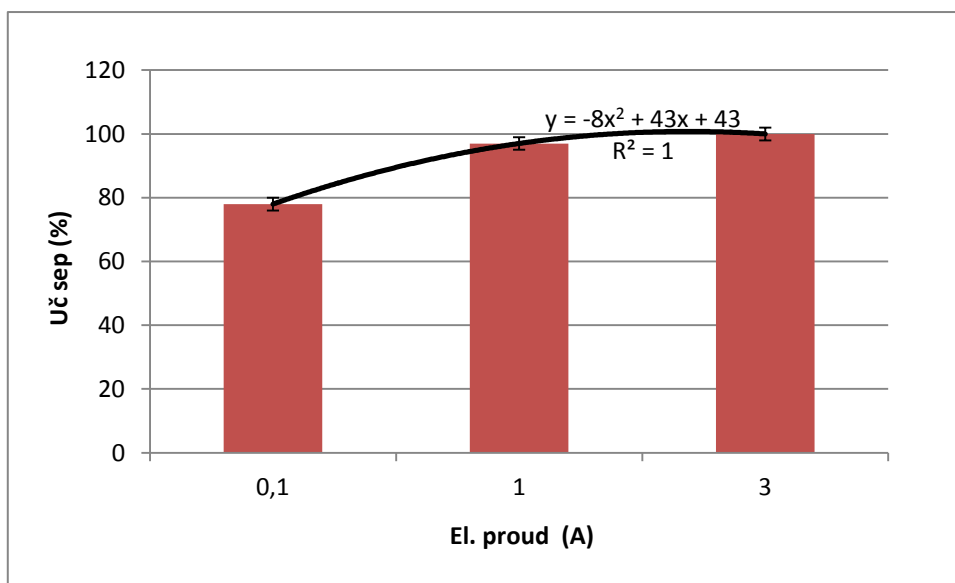
3.3.4. Fáze 2 – Testovací separace magnetitu a směsi nanočástic Fe_2O_3

Separace částic u magnetitu

Při testovací separaci magnetitu se použilo 7g na smíchání s 500 ml destilované vody. Magnetická separace u této suspenze byla opět (postup provedení je podobný jako u 1. fáze a obecného postupu) provedena třikrát podle velikosti proudu procházející cívkou mag. separátoru, s tím rozdílem, že u prvního pracovního režimu bylo použito napájení cívkou o velikosti 0,1 A pro větší rozdíl optické účinnosti. Následně se vyhodnotila optická účinnost magnetitu (viz. tab. 7 a obr. 37) na spektrálním fotometru Spekolu 1.

Tabulka 7 Optická účinnost mag. separace magnetitu (průsvitnost separované suspenze)

El. proud (A)	průsvitnost (%)
0,1	78
1	97
3	100



Obrázek 37 Průsvitnost magnetitu podle el. proudu procházející cívkou

Rovnice vyjadřuje teoretickou závislost účinnosti separátoru na proudu částic procházející separátorem.

R^2 – vyjadřuje, zda se teoretická křivka odděluje od jednotlivých experimentálních bodů.

Magnetická separace částic u směsi mikročástic α - Fe₂O₃ (hematit), β - Fe₂O₃, γ - Fe₂O₃ (maghemit)

Magnetické rozduřování u této látky se nakonec neprovádělo z důvodu slabého zakalení roztoku. Tento materiál totiž rychle sedimentoval na dno kádinky, tudíž by bylo obtížné naměřit rozdílnou průsvitnost spektrálním fotometrem.

U všech testovacích separací jsme se přesvědčili, že průtokový magnetický separátor správně pracuje.

3.3.5. Fáze 3 - Výsledná magnetická separace kalu z Třineckých železáren

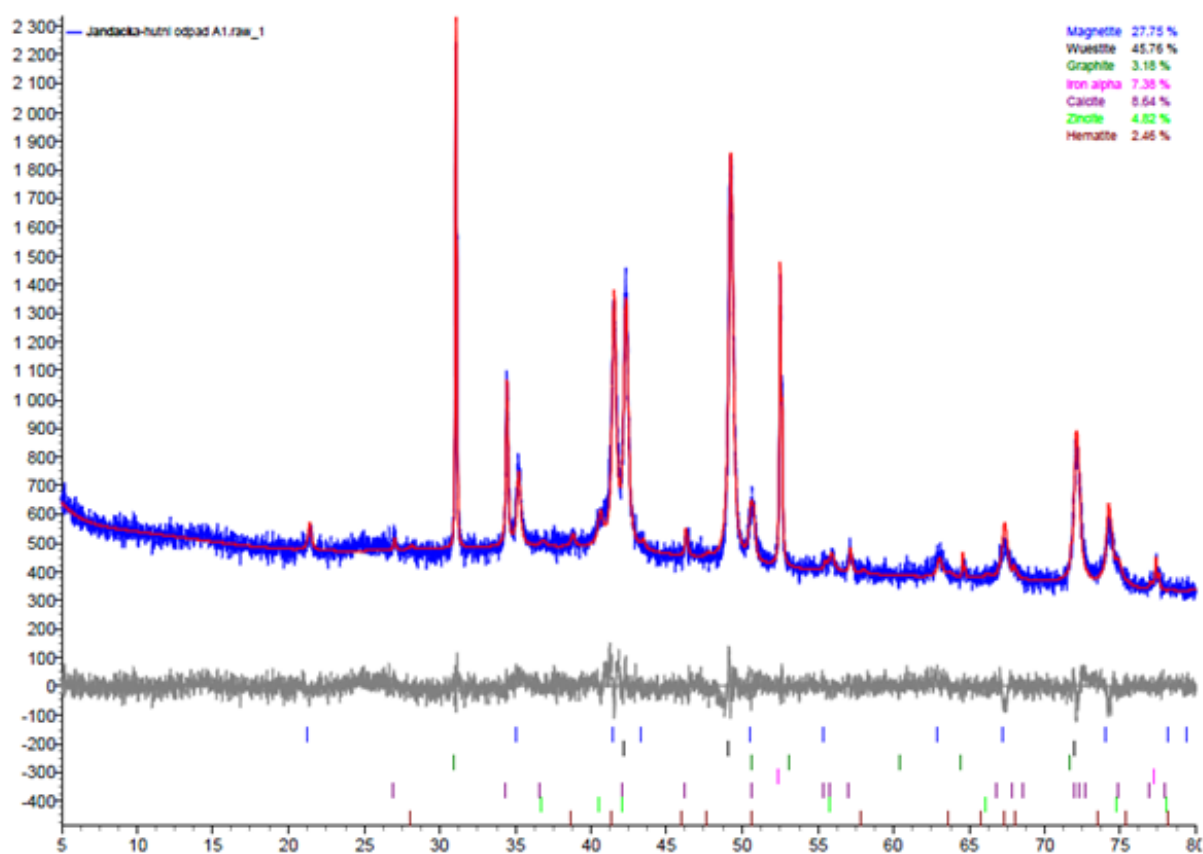
Průběh laboratorní operace:

- Kal v práškové formě o hmotnosti 5 g byl smíchán s destilovanou vodou a to pro každý pracovní režim.
- Provedení dvousložkové magnetické separace kalu probíhala ve třech pracovních režimech podle zvolené velikosti napájení procházející cívkou separátoru (pro 1A, 2A, 3A), tak jak tomu bylo u první fáze testování separátoru (podrobný postup je také shodný jako u obecného postupu separace)
- Po separaci byly výsledné složky odfiltrovány, vysušeny a následně smíchány dohromady pro lepší rozbor el. mikroskopu (viz. použité přístroje).

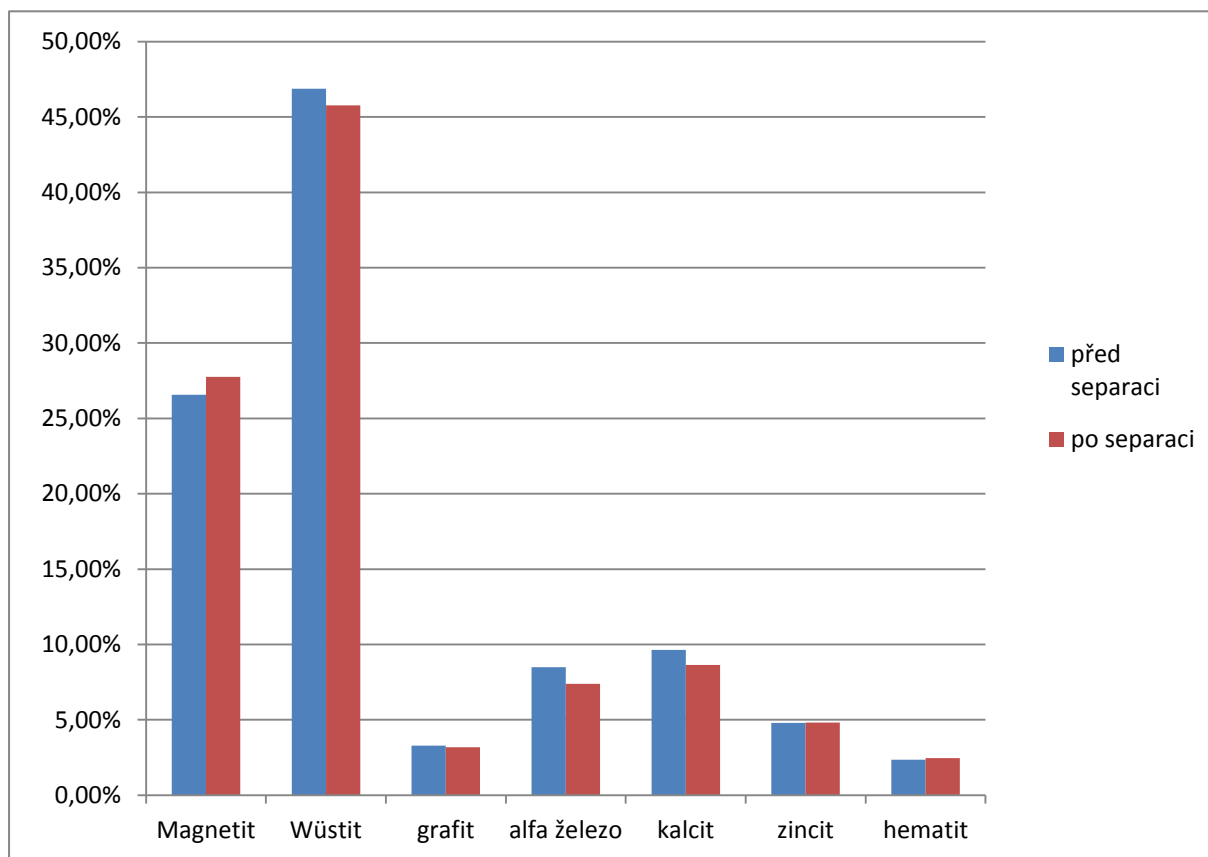
Výsledné vyhodnocení poté ukázalo, že dvousložková separace nebyla úspěšná. Laboratorní separátor totiž nedokázal odseparovat magnetické složky od nemagnetických, a to z důvodů pravděpodobného zpečení jednotlivých částic do sebe vlivem průmyslové výroby (viz obr. 40 a 41).



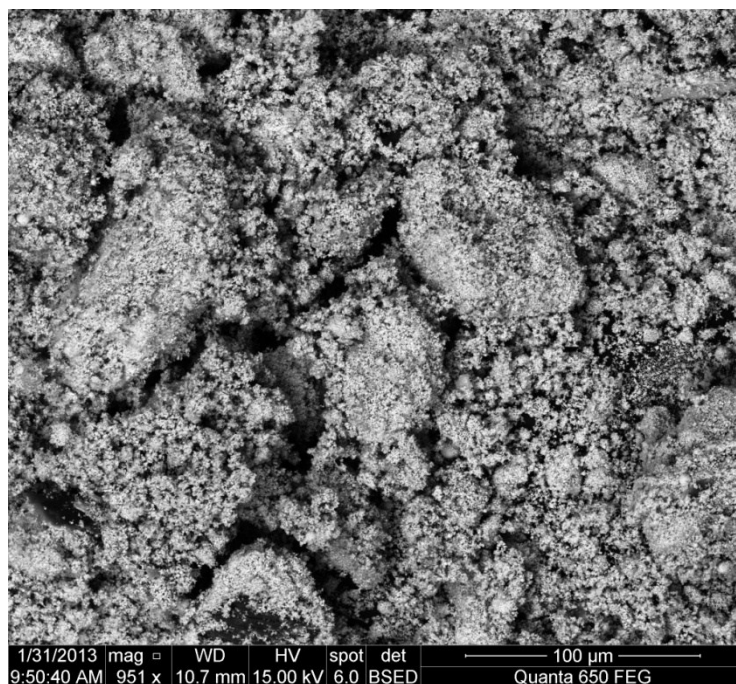
Obrázek 38 Výsledné složky po separaci kalu seřazené podle el. proudu procházející cívkou separátoru



Obrázek 39 RTG difrakce kalu z Třince po separaci (intenzita RTG záření vs úhel dopadu RTG svazku na vzorek)



Obrázek 40 Jednotlivé hmotnostní složky obsažené v kalu z TŽ před i po separaci



Obrázek 41 Kal z Třineckých železáren zvětšen na 100 μm elektronovým mikroskopem

4. Závěr

Diplomová práce se zabývala možností recyklací odpadů z hutnického průmyslu za pomoci mokré dvousložkové magnetické separace.

V první řadě se v praktické části zjišťovaly magnetické vlastnosti u jednotlivých zkoumaných materiálů pomocí magnetometru, a to ve formě magnetických hysterezních křivek a susceptibilit jednotlivých látek. Hysterezní křivky ve srovnávacím grafu názorně ukázaly, že slabé magnetické účinky vykazují bentonit spolu se směsí částic Fe_2O_3 , naopak magnetit spolu s kalem vykazovaly silné feromagnetické vlastnosti. Magnetické susceptibility poté v tabulce č. 5 číselně potvrdily, že magnetit má očekávaně nejsilnější magnetické vlastnosti, následoval kal z Třineckých železáren, až pak s odstupem směs mikročástic Fe_2O_3 a nejmenší susceptibilita byla naměřena u bentonitu.

V další kapitole se testovala funkčnost laboratorního magnetického separátoru a následně se prováděla výsledná separace hutnického odpadu (kalu z Třineckých železáren). Jako první se zjišťovalo magnetické pole na konci cívky separátoru při jednotlivých zvolených velikostech el. proudu procházející danou cívkou. Toto měření na obrázku č. 35 ukázalo vzrůstající magnetické pole při zvětšujícím se elektrickému proudu procházející cívkou, a jak už bylo řečeno v dané podkapitole, měření mag. pole prokázalo, že cívka separátoru generuje mag. pole. Další operace byly rozděleny na tři fáze. První fáze pomocí dvousložkové separace bentonitu a magnetitu vizuálně ověřila účinnost separátoru. Následující druhá fáze otestovala u separátoru optickou účinnost při separaci magnetitu pomocí spektrálního fotometru. Obě tyto fáze ukázaly, že testovaný laboratorní separátor byl plně funkční k třetí fázi a tedy výsledné separaci kalu z TŽ Třinec.

Výsledky konečné separace ukázaly, že i při velkém elektrickém proudu protékající cívkou laboratorního separátoru se protékající koncentrát odseparuje, ale v odseparované složce hutnického kalu z TŽ bylo pomocí rentgenu objeveno (viz. Obrázek 39 a 40), že složení látky je hodně podobné vstupnímu koncentrátu před separací. Tento problém poté objasnil elektronový mikroskop, který při několikanásobném zvětšení naznačil, že nanočástice s různými magnetickými vlastnostmi mohly být vzájemně spojené do sebe.

Tato diplomová práce by vzhledem k výsledku nedoporučovala mokrou mag. dvousložkovou separaci jako recyklaci látek procházející hutnickou výrobou, ale jak už je řečeno také v teoretické části, mokrou mag. separaci je možné použít pro jiné účely (při třídění kovů, čištění vody znečištěné jemnozrnnými kovy atd.)

Aspekty týkající se hutnické recyklace či rozdružovacích procesů, které v této práci nejsou zahrnuté, mohou dále sloužit pro budoucí témata bakalářských nebo diplomových prací.

Seznam použité literatury

- [1] HALLIDAY, D., R. RESNICK a J. WALKER. *Fyzika: Část 3: Elektřina a magnetismus*. Vyd. 1. M. ŠTRUNC a kol. Brno: Vutium, 2000, 577-888. ISBN 80-214-1868-0.
- [2] KUBÍNEK, R. *Elektřina a magnetismus*. Olomouc: Univerzita Palackého, 2012, 223 s. ISBN 978-80-244-3360-8.
- [3] SEDLÁK, B., I. ŠTOLL. *Elektřina a magnetismus*. Praha: Academica, 1993, 600 s. ISBN 80-7066-715-X.
- [4] MECHLOVÁ, E., KOŠTÁL, K. *Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz*. Praha: Prometheus, 2001, 588 s. ISBN 80-7196-151-5.
- [5] EICHHOLZ, C., M. STOLARSKI, V. GOERTZ, H. NIRSCHL. Magnetic field enhanced cake filtration of superparamagnetic PVAc-particles. *Chemical engineering science: Le Journal International de genie chimique*. Oxford: Pergamon Press, 2008, roč. 63, č. 12, s. 3193-3200. ISSN 0009-2509 [online]. [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250908001723>.
- [6] HATCH, P. G. a R. E. STELTER, Magnetic design consideration for devices and particles used for biological high – gradient magnetic separation (HGMS) systems. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2001, roč. 225, s. 262-276. ISSN 0304-8853 [online]. [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885300012506>.
- [7] Magnetické vlastnosti. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2013-01-23]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main/article/view/295-magneticke-vlastnosti-latek>.
- [8] BAS, J. A., J. A. CALERO, M. J. DOUGAN. Sintered soft magnetic materials. Properties and applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2003, roč. 254-255, s. 391-398. ISSN 0009-2509 [online]. [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://80.www.sciencedirect.com/dialog/cvut.cz/science/article/pii/S0304885302009344>.

- [9] POVONDRA, P. a J. ULRYCH. *Základy úpravnictví a separace minerálů*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1988, 105 s.
- [10] JIANFEI SUNA, RUI XUB, YU ZHANG, MING MA. Magnetic nanoparticles separation based on nanostructures. (2006). *State key Laboratory of BioElectronics, School of Biological Science and Medical Engineering*, SouthEast University, Nanjing 210096, China. ISSN: 0304-8853.
- [11] CAFER T. a kol. Colvin. Low-Field Magnetic Separation of Monodisperse Fe₃O₄ Nanocrystals. *Science*. 2006, roč. 964 – 967, s. [online]. [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <<http://www.sciencemag.org/content/314/5801/964.short>>.
- [12] AHN, C., H., M. ALLEN, G. W. TRIMMER, Y. JUN a S. ERRAMILI. A Fully Integrated Micromachined Magnetic Particle Separator. *Journal of microelectromechanical systems*. 1996, roč. 151 – 158, s. ISSN 1057-7157 [online]. [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://mems.gatech.edu/msmaweb/site_2006/publications/publication_list_files/1996/A%20Fully%20Integrated%20Micromachined%20Magnetic%20Particle%20Separator.pdf>.
- [13] FRIEDMAN, G., B. YELLEN. Magnetic separation, manipulation and assembly of solid phase in fluids. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2005, roč. 158 – 166, s. [online]. [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <<http://80.www.sciencedirect.com/dialog/cvut.cz/science/article/pii/S1359029405000555>>.
- [14] CAFER, T., Y., A. PRAKASH, J. T. MAYO, V. L. COLVIN. Magnetic separations: From steel plants to biotechnology. *Chemical engineering science*. 2009, roč. 2510 – 2521, s. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250908006477>>.
- [15] OBERTEUFFER, J. A. Magnetic Separation: A Review of Principles, Devices, and Applications. *IEEE Transactions on magnets*. 1974, roč. 223 – 238, s. ISSN: 0018-9464 [online]. [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1058315&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D1058315>.

- [16] Magsy, spol. s.r.o. – magnetické separátory (odlučovače kovů) [online]. 2013 [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: <<http://www.magsy.cz/24669-magneticke-separatory>>
- [17] Jelínek – trading spol. s.r.o. – extra silné magnetické separátory [online]. 2013 [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: <<http://www.jelinek-trading.cz/cz/kategorie/extra-silne-magneticke-separatory.aspx>>
- [18] Selos Bohemia, s.r.o. – magnetické separátory [online]. 2013 [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: <<http://www.magnety.sk/cz/magneticke-separatory/>>
- [19] SEIDLOVÁ, J. *Metody hodnocení metalurgických odpadů*. Ostrava: Repronis, 2009, 117 s. ISBN 978-80-7329-216-4.
- [20] ČSN 83 8001: Názvosloví odpadů. *Český normalizační institut*, Praha 1994.
- [21] KRÉT, J. *Recyklace odpadů hutnictví železa*. Ostrava: VŠB-TUO, 2003, 91s ISBN 80-248-0511-1.
- [22] OGROCKÁ, S. *Přehled a možnosti recyklace vybraných hutních odprašků*. Ostrava, 2010. Dostupné z: <<https://dspace.vsb.cz/handle/10084/82087>. *Bakalářská práce. VŠB-TUO*>.
- [23] ŘEPKA, V., J. BOTULA a R. SAMKOVÁ. Odpady z výroby železa a oceli a jejich recyklace. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2006, č. 12, s. 334-337. Dostupné z: <<http://web.tuke.sk/hf-knkaso/content/veda/konferencie/waste/repka.pdf>>.
- [24] Elimag MP-1 - mikroprocesorem řízený 3-D teslametr [online]. 2013 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <<http://www.elidis.cz/53-elimag-mp-1.html>>.
- [25] EV9 Vibrating Sample Magnetometer (VSM)[online]. 2013 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <<http://www.microsense.net/products-vsm-ev9.htm>>.
- [26] Rastrovací elektronové mikroskopy – SEM [online]. 2013 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <<http://www.edlin.cz/fei/21quanta.htm>>.
- [27] Magnetite mineral data [online]. 2013 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <<http://webmineral.com/data/Magnetite.shtml>>.
- [28] Chao-An CHIU, K. D. HRISTOVSKI, R. DOCKERY, K. DOUDRICK, P. WESTERHOFF. Modeling temperature and reaction time impacts on hematite

nanoparticlesize during forced hydrolysis of ferric chloride. *Chemical engineering journal*. 2012, roč. 357 – 362. Dostupné z: <<http://80.www.sciencedirect.com/dialog/cvut.cz/science/article/pii/S1385894712011679>>.

- [29] Maghemite mineral data [online]. 2013 [cit. 2013-03-25]. Dostupný z: <<http://webmineral.com/data/Maghemite.shtml>>.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Struktura paramagnetické látky - překresleno podle ^[7]	5
Obrázek 2 Účinek mag. pole v doméně feromagnetického materiálu - překresleno podle ^[6]	6
Obrázek 3 Hystereze feromagnetického materiálu - překresleno podle článku ^[8]	8
Obrázek 4 Schéma konvenční magnetického separátoru s permanentními magnety - překresleno podle ^[12]	12
Obrázek 5 Magnetický separátor typu Kolm - překresleno podle ^[15]	13
Obrázek 6 Roštový typ mag. separátoru - překresleno podle ^[15]	13
Obrázek 7 Schematické znázornění suchého bubnového separátoru - překresleno podle ^[15]	14
Obrázek 8 Mokřý souběžný bubnový separátor - překresleno podle ^[15]	15
Obrázek 9 Protiběžný separátor - překresleno podle ^[15]	15
Obrázek 10 Protiproudový separátor - překresleno podle ^[15]	16
Obrázek 11 pásový separátor – překresleno podle ^[15]	17
Obrázek 12 Potrubní separátor od firmy Jelinek – Trading ^[17]	18
Obrázek 13 Pásový separátor při zpracování odpadů ^[18]	18
Obrázek 14 Rozdělení světové produkce šrotu - překresleno podle ^[19]	19
Obrázek 15 Schéma vzniku vedlejších produktů při výrobě železa a oceli - překresleno podle ^[21]	22
Obrázek 16 Snímek vysokopecních kalů, zvětšení 800x ^[19]	26
Obrázek 17 Snímek částic jemných ocelářských kalů, zvětšení 30x ^[19]	27
Obrázek 18 Teslametr s Hallovou sondou Elimag MP-1 ^[24]	28
Obrázek 19 Microsense Magnetometr EV9 Vibrating Sample ^[25]	29
Obrázek 20 Elektronový mikroskop Quanta 650 FEG ^[26]	30
Obrázek 21 Laboratorní zdroj HY1803D	31
Obrázek 22 Spektrální fotometr Spekol 1	31
Obrázek 23 Magnetizační hysterezní křivka u bentonitu	32
Obrázek 24 Magnetizační hysterezní křivka s rovnicí susceptibility u bentonitu	33
Obrázek 25 Magnetizační hysterezní křivka u magnetitu	34
Obrázek 26 Magnetizační hysterezní křivka s rovnicí susceptibility u magnetitu	34
Obrázek 27 Magnetizační hysterezní křivka u Směsi mikročástic Fe ₂ O ₃	35
Obrázek 28 Magnetizační hysterezní křivka s rovnicí susceptibility u směsi mikročástic Fe ₂ O ₃	36
Obrázek 29 Kal z Třineckých železáren	36
Obrázek 30 Magnetizační hysterezní křivka u Kalu	37
Obrázek 31 Magnetizační hysterezní křivka s rovnicí susceptibility u kalu	37
Obrázek 32 Srovnání mag. hysterezních křivek u všech zkoumaných materiálů	38
Obrázek 33 Laboratorní mag. průtokový separátor	40
Obrázek 34 Cívka a zkumavka s ocelovou vatou	41
Obrázek 35 Magnetické pole na konci cívky separátoru	42
Obrázek 36 Celá sestava průtokového mag. separátoru	43
Obrázek 37 Průsvitnost magnetitu podle el. proudu procházející cívku	44
Obrázek 38 Výsledné složky po separaci kalu seřazené podle el. proudu procházející cívku separátoru	46
Obrázek 39 RTG difrakce kalu z Třince po separaci (intenzita RTG záření vs úhel dopadu RTG svazku na vzorek)	46
Obrázek 40 Jednotlivé hmotnostní složky obsažené v kalu z TŽ před i po separaci	47
Obrázek 41 Kal z Třineckých železáren zvětšen na 100 μm elektronovým mikroskopem	47

Seznam tabulek

Tabulka 1 Průměrné složení odprašků	23
Tabulka 2 Průměrné složení vysokopecních prachů vyjádřené v hmot. %.	25
Tabulka 3 Průměrné složení vysokopecních kalů vyjádřené v hmot. %.	25
Tabulka 4 Průměrné složení ocelářenských odprašků (OO) a kalů – jemných (OKJ) i hrubých (OKH) vyjádřené v hmot. %.	26
Tabulka 5 Susceptibility u jednotlivých látek	39
Tabulka 6 Měření magnetického pole u cívky separátoru	41
Tabulka 7 Optická účinnost mag. separace magnetitu (průsvitnost separované suspenze)	44